

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

**BEZDRÁTOVÁ SENZORICKÁ SÍŤ VYUŽÍVAJÍCÍ LORA
TECHNOLOGII**

WIRELESS SENSORY NETWORK USING LORA TECHNOLOGY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Michal Mikulášek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Vladislav Škorpil, CSc.

BRNO 2018

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Teleinformatika**

Ústav telekomunikací

Student: Michal Mikulášek

ID: 184024

Ročník: 3

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Bezdrátová senzorická síť využívající LoRa technologii

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte koncepci bezdrátové senzorické sítě využívající LoRa technologii (moduly RFM95) pro snímání teploty vzduchu, vlhkosti, intenzity světla a možnosti použít univerzální vstupně/výstupní porty – GPIO. Snímané hodnoty se budou předávat z centrální jednotky pomocí vhodného protokolu po sériové lince. Pro samotnou senzorickou jednotku je kritickým parametrem spotřeba energie – musí být co nejmenší s ohledem na životnost baterie řádově v letech. Navrhněte vhodné řešení. Realizujte navržený bezdrátový senzor na platformě Atmel AVR, popř. Arduino (mini). Ověřte jeho funkčnost a dokumentujte minimální energetickou náročnost navrženého řešení.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] MANN, B. C pro mikrokontroléry, BEN, 2003. ISBN 80-7300-077-6

[2] VODA, Z. Arduino - Průvodce světem Arduina, Nakladatelství Martin Stříž, Bučovice 2015, 240 stran, ISBN 978-80-87106-90-7

Termín zadání: 5.2.2018

Termín odevzdání: 29.5.2018

Vedoucí práce: doc. Ing. Vladislav Škorpil, CSc.

Konzultant: Ing. Ondřej Pavelka, Honeywell

prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Bakalářská práce se v první polovině zabývá Internetem věcí obecně a dostupnými bezdrátovými technologiemi pro Internet věcí. Ke každé technologii jsou zmíněny jejich vlastnosti, klady a zápory a také možnosti uplatnění v Internetu věcí. V druhé polovině práce je proveden praktický návrh a sestavení sítě s technologií LoRa, skládající se ze senzorické a centrální jednotky. Součástí řešení jsou navržená schémata zapojení, desky plošných spojů a podrobná fotodokumentace. Dále jsou popsány postupy řešení softwaru pro oba typy jednotek s podrobným popsáním navržených funkcí. Pro celé řešení je otestován a zdokumentován možný maximální dosah. Následně je provedeno podrobné měření spotřeby energie senzorické jednotky a rozsáhlý odhad její výdrže na zvolenou baterii.

Klíčová slova

Arduino, ATmega328P, Atmel AVR, BH1750FVI, Bluetooth, BMP280, brána, centrální jednotka, DS18B20, Li-Ion, LoRa, LoRaWAN, LTE, NB-IoT, RFID, RFM95, senzorická jednotka, Sigfox, spotřeba energie, TPL5110, Wi-Fi, ZigBee, Z-Wave.

Abstract

The bachelor thesis focuses in the first half on the Internet of Things and the available wireless technologies for the Internet of Things. Each technology is characterized by its features, pros and cons, as well as the possibilities of using it in the Internet of Things. In the second half of the thesis, a practical design and construction of a LoRa network, consisting of a sensory and a central unit, is carried out. The parts of the solution are designed wiring schemes, printed circuit boards and detailed photo documentation. Additionally the software solutions for both types of units are described, with detailed descriptions of the proposed features. The maximum possible range is tested and documented for the entire solution. Subsequently, a detailed measurement of the power consumption of the sensor unit is carried out and an extensive estimation of its battery life for a selected battery.

Keywords

Arduino, ATmega328P, Atmel AVR, BH1750FVI, Bluetooth, BMP280, Gateway, Central Unit, DS18B20, Li-Ion, LoRa, LoRaWAN, LTE, NB-IoT, RFID, RFM95, Sensor Unit, Sigfox, Power Consumption, TPL5110, Wi-Fi, ZigBee, Z-Wave.

Bibliografická citace:

MIKULÁŠEK, M. Bezdrátová senzorická síť využívající LoRa technologii. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 79 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Vladislav Škorpil, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci na téma „Bezdrátová senzorická síť využívající LoRa technologii“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrální práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne 29. května 2018

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Vladislavu Škorpilovi, CSc. za metodickou a pedagogickou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat konzultantovi panu Ing. Ondřeji Pavelkovi za odbornou pomoc, trpělivost a podnětné návrhy při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne 29. května 2018

.....
podpis autora

Obsah

Úvod	11
1 Internet of things	12
1.1 Obecné informace	12
1.2 Dostupné bezdrátové technologie	13
1.2.1 RFID	13
1.2.2 Wi-Fi (IEEE 802.11)	14
1.2.3 Bluetooth (IEEE 802.15.1)	15
1.2.4 ZigBee	16
1.2.5 Mobilní sítě	17
1.2.6 Z-Wave	19
2 LPWAN	21
2.1 Sigfox	21
2.2 LoRa	23
2.2.1 Fyzická vrstva (PHY) LoRa™	23
2.2.2 LoRaWAN™	26
3 Senzorická jednotka	30
3.1 Výběr komponent	30
3.2 Návrh zapojení a DPS	35
3.3 Krycí krabička	36
3.4 Firmware	38
3.5 Struktura datových jednotek	40
4 Centrální jednotka	44
4.1 Výběr komponent	44
4.2 Návrh zapojení a DPS	45
4.3 Firmware	46
4.4 Krycí krabička	47
4.5 Struktura datových jednotek	48
5 Testování navrženého řešení	50
5.1 Testování maximálního dosahu	50
5.2 Dokumentace energetické náročnosti	51
5.2.1 Průběh odběru proudu během jednoho měřicího cyklu	52
5.2.2 Průběh odběru proudu během jednoho měřicího cyklu při změně stavů relé	54
5.2.3 Odhad výdrže na baterii	55
5.2.4 Odhad výdrže na baterii při volbě jiného intervalu spánku	56
Závěr	58
Literatura	60

Seznam symbolů, veličin a zkratek.....	64
Přílohy	66
A Schéma zapojení senzorické jednotky verze 1.0.....	67
B DPS pro senzorickou jednotku verze 1.0	69
C Schéma zapojení senzorické jednotky verze 2.0.....	71
D DPS pro senzorickou jednotku verze 2.0	74
E Schéma zapojení centrální jednotky verze 1.0	76
F DPS pro centrální jednotku verze 1.0.....	77
G Obsah přiloženého paměťového média	79

Seznam obrázků

Obr. 1.1: Topologie zapojení [10].....	17
Obr. 1.2: Pracovní režimy NB-IoT [14].	19
Obr. 2.1: Průběh frekvence CSS modulace v čase [21].....	24
Obr. 2.2: Struktura LoRa™ fyzického rámce [21].....	25
Obr. 2.3: Struktura LoRa technologie z hlediska ISO/OSI modelu [22].	26
Obr. 2.4: Struktura LoRaWAN™ sítě [23].....	27
Obr. 3.1: Sestavená krabice s osazenou DPS senzorické jednotky.	37
Obr. 3.2: Vývojový diagram průběhu programu senzorické jednotky.	40
Obr. 3.3: Struktura základního datového paketu.....	41
Obr. 3.4: Struktura kódovaných dat pro externí čidlo BMP280.....	42
Obr. 3.5: Struktura kódovaných dat pro externí čidlo BH1750FVI.	43
Obr. 3.6: Struktura kódovaných dat pro externí čidlo DS18B20.	43
Obr. 4.1: Vývojový diagram průběhu programu centrální jednotky.....	47
Obr. 4.2: Sestavená krabice včetně osazené DPS centrální jednotky.	48
Obr. 4.3 Struktura paketu odpovědi od centrální jednotky.....	49
Obr. 5.1: Mapa s vyznačenými měřicími místy.	51
Obr. 5.2: Průběh odběru proudu senzorické jednotky během měřícího cyklu.	53
Obr. 5.3: Průběh odběru proudu senzorické jednotky během změny stavu jednoho relé.	54
Obr. 5.4: Průběh odběru proudu senzorické jednotky během změny stavu dvou relé.	54
Obr. 5.5: Odhad výdrže senzorické jednotky při neuvažování samovybití baterie pro různé intervaly spánku.	57
Obr. 5.6: Odhad výdrže senzorické jednotky při uvažování samovybití baterie pro různé intervaly spánku.	57
Obr. Příloha.0.1: Schéma zapojení senzorické jednotky verze 1.0 část 1.....	67
Obr. Příloha.0.2: Schéma zapojení senzorické jednotky verze 1.0 část 2.....	68
Obr. Příloha.0.3: Měděná vrstva - vrchní (Top).....	69
Obr. Příloha.0.4: Měděná vrstva - spodní (Bottom).....	69
Obr. Příloha.0.5: Osazovací výkres - vrchní (Top).....	70
Obr. Příloha.0.6: Osazovací výkres - spodní (Bottom).....	70
Obr. Příloha.0.7: Schéma zapojení senzorické jednotky verze 2.0 část 1.....	71
Obr. Příloha.0.8: Schéma zapojení senzorické jednotky verze 2.0 část 2.....	72
Obr. Příloha.0.9: Schéma zapojení senzorické jednotky verze 2.0 část 3.....	73
Obr. Příloha.0.10: Měděná vrstva - vrchní (Top).....	74
Obr. Příloha.0.11: Měděná vrstva - spodní (Bottom).	74
Obr. Příloha.0.12: Osazovací výkres - vrchní (Top).	75
Obr. Příloha.0.13: Osazovací výkres - spodní (Bottom).	75

Obr. Příloha.0.14: Schéma zapojení centrální jednotky verze 1.0.....	76
Obr. Příloha.0.15: Měděná vrstva - vrchné (Top).	77
Obr. Příloha.0.16: Měděná vrstva - spodní (Bottom).	77
Obr. Příloha.0.17: Osazovací výkres - vrchní (Top).	78
Obr. Příloha.0.18: Osazovací výkres - spodní (Bottom).	78

Seznam tabulek

Tab. 1.1: Přenosová rychlost podle frekvenčního pásma [9].....	16
Tab. 2.1: Porovnání přenosové rychlosti a citlivosti LoRa™ modulace a FSK modulace [20].....	25
Tab. 3.1: Technické specifikace ATmega328P [26].	31
Tab. 3.2: Technické specifikace DS18B20 [29].....	32
Tab. 3.3: Technické specifikace digitálního čidla BMP280 [30].....	33
Tab. 3.4: Technické specifikace digitálního čidla BH1750FVI [31].	33
Tab. 3.5: Technické specifikace polarizovaného relé AZ850P2-3 [32].....	34
Tab. 3.6: Technické specifikace lineárního regulátoru MCP1700 [33].	34
Tab. 3.7: Technické specifikace externího časovače TPL5110 [34].	35
Tab. 4.1: Technické specifikace LM1117IMP-3.3 [40].....	45
Tab. 5.1: Naměřené dosažené vzdálenosti v několika měřicích bodech a jejich RSSI, SNR.....	51
Tab. 5.2: Odhad výdrže senzorické jednotky zaokrouhlený na celé dny ve formátu [Y – roky, M – měsíce, D – dny].	56

ÚVOD

Cílem této bakalářské práce je teoreticky rozebrat dostupné technologie v oblasti Internetů věcí (Internet of Things) a poté navrhnout a realizovat vhodné řešení bezdrátové senzorické sítě založené na LoRa technologii.

V první kapitole je rozebrán Internet věcí obecně a dostupné bezdrátové technologie, které jsou používány nebo jsou plánovány pro brzkou budoucnost, pro „Internet věcí“.

V druhé kapitole jsou popsány nejperspektivnější LPWAN (Low Power WAN) technologie s jejich klady i zápory. Součástí této kapitoly je rozbor LoRa technologie včetně protokolu LoRaWAN™.

Třetí kapitola se věnuje návrhu a realizaci senzorické jednotky. Jsou zde uvedeny zvolené komponenty s popisy jejich vlastností a výčtem technických specifikací. Dále návrh zapojení a navržená deska plošných spojů. Následně je rozebrán navržený software včetně struktury datových jednotek. V neposlední řadě je popsán postup při realizaci finálního prototypu včetně stavby krycí krabičky.

Čtvrtá kapitola se věnuje návrhu a realizaci centrální jednotky. Jsou zde uvedeny zvolené komponenty s popisy jejich vlastností a výčtem technických specifikací. Dále návrh zapojení a navržená deska plošných spojů. Následně je rozebrán navržený software včetně struktury datové jednotky. Nakonec je popsán postup při realizaci finálního prototypu včetně návrhu krycí krabičky.

Poslední kapitola se zabývá testováním navrženého řešení. A to testem dosahu řešení při různých nastaveních. Dále je popsáno měření spotřeby senzorické jednotky. Na toto měření navazuje odhad spotřeby jednotky na zvolenou baterii včetně ideálních případů. Také je odhadnuta spotřeba pro jiné případy nastavení sítě.

1 INTERNET OF THINGS

1.1 Obecné informace

Pojem Internet of Things (zkráceně IoT), česky internet věcí, není zcela přesně definovaný, ale nejčastěji označuje věci (Things), které jsou propojeny za účelem jejich komunikace. Tyto věci si v rámci připojené sítě vyměňují získaná data, která dále používají k vykonání jednoduchých až velmi složitých činností. Celý cíl IoT je vybavit jistou inteligencí všechny předměty každodenní činnosti a tím zajistit, že dané předměty budou ve vykonávání jejich činnosti chytřejší (nejlépe o krok napřed) a tím zajistí mnohem vyšší uživatelský komfort, jednoduchost použití, vyšší efektivitu a lepší provázanost jednotlivých systémů.

Samotná věc v IoT označuje jakýkoli předmět, který je díky čidlům a připojení do sítě schopen komunikovat s ostatními věcmi a také aplikovat procesy v reálném světě. Z hlediska komunikace věcí s okolím dělíme komunikaci na M2M (Machine to Machine, stroj se strojem) a M2H (Machine to Human, stroj s člověkem).

Zatímco M2M si lze představit jako komunikaci mezi chytrým termostatem a senzory rozmístěnými po celém domě. Kdy termostat bude na základě nastavené teploty regulovat topení a klimatizaci podle teplot obdržených od senzorů. Takovýmto řešením se zvyšuje efektivita využití zdrojů energie, a navíc odpadá nutnost uživatele neustále sledovat stav teploty v domě a provádět změny nastavení, o vše se stará síť chytrých věcí. Naopak pro M2H je typická situace, kdy chytrá lednice zaznamená nízký stav potravin a podle nastaveného algoritmu informuje majitele o jejich nedostatku, případně mu doporučí oblíbený obchod, který například vypožadovala z předešlých nákupů.

Uplatnění IoT je možné ve spoustě aplikací počínaje relativně jednoduchými činnostmi jako jsou např. sledování stavu naplnění odpadkového koše nebo pravidelné čtení stavu okolí (teplota, vlhkost, intenzita světla atd.) přes komplexnější činnosti: sledování prezence osob v místnosti za účelem zapnutí světel, ovládání vzduchotechniky atd. Za vrchol IoT lze považovat řízení a správu celých továren, energetických sítí nebo celých měst (Smart cities).

Největší obavy spojené s IoT jsou bezpečnost uživatelských dat a jak s nimi správně nakládat. Díky velké síti zařízení, která neustále generují data, jenž také obsahují informace o jejich uživateli. Tyto data by v nesprávných rukou poskytla příliš informací o jejich uživateli, případně otevřela možnosti k jejich napadení. Za tímto účelem jsou v IoT vynaloženy nemalé prostředky na vývoj a implementaci bezpečnostních pravidel [1].

1.2 Dostupné bezdrátové technologie

Pro spojení IoT zařízení je možné použít kteroukoli dnes běžně dostupnou technologii, ale není zaručeno, že zvolená technologie bude poskytovat optimální výsledky při vykonávané činnosti. Proto je dnes IoT rozvětven do několika dostupných technologií a v závislosti na požadavcích je možné si zvolit optimální variantu.

V rámci této kapitoly bude rozebráno několik nejběžněji používaných bezdrátových technologií, které pracují buď na volných (ISM) pásmech, nebo na placených (typ. GSM sítě). Technologie budou probrány jak z hlediska jejich specifikací, tak i vlastností a také bude zmíněno možné typické uplatnění v oblasti IoT.

1.2.1 RFID

Neboli Radio-Frequency IDentification, tedy identifikace na rádiové frekvenci. Tato technologie je dnes nejznámější jako metoda autorizace pro vstupy do vyhrazených prostor. Celý systém komunikace je složen z čtečky a tagu (štítku).

Tag může mít formu nálepky, přívěsku na klíče anebo karty podobné kreditní kartě. Samotný tag je složen ze dvou komponentů: antény, která přijímá a vysílá signál, a integrovaného obvodu, který obsahuje paměť s uloženou informací. Tagy se dělí na pasivní a aktivní, kde pasivní neobsahuje baterii a je napájen pouze z elektromagnetické energie přijaté od čtečky. Naopak aktivní tag obsahuje baterii a v pravidelných intervalech posílá informace uložené v paměti integrovaného obvodu. Tagy se dále dělí na read-only (pouze ke čtení) a read/write (přepisovatelné). Read-only tag má již z výroby přiřazené sériové číslo sloužící k identifikaci, zatímco read/write tag lze přehrát uživatelsky definovanými daty.

Čtečka slouží k vybuzení nebo aktivaci tagu a přečtení obsahu jeho paměti. Po přečtení informace jsou předány přečtené informace dále na server, který provádí další operace s provedenými informacemi (typ. shoda/neshoda s údaji v databázi). Nejpoužívanější frekvence pasivních RFID štítků jsou:

- 125-134 kHz – Běžný dosah se pohybuje mezi 1 až 10 centimetry. Použití je například v identifikaci zvířat (čip pod kůží).
- 13,56 MHz – Dosah se pohybuje od 1 centimetru až po 1 metr. Použití je např. pro vstupní karty.
- 868-960 MHz – Tyto pasivní štítky mohou být přečteny ze vzdálenosti až 5-6 metrů, případně s větší anténou až z více jak 30 metrů. Typické použití je sportovní časomíra, sledování zboží v logistice, mýtné brány a jiné aplikace vyžadující větší čtecí vzdálenost.

Aktivní RFID štítky pracují na frekvencích 433 a 915 MHz. Samotné štítky jsou často v pouzdře, které je chrání před povětrnostními vlivy a obvykle jsou schopny operovat okolo 3 až 5 let na baterii. Jejich cena je oproti pasivním mnohem vyšší, a proto jsou převážně používány v aplikacích, kde je hlavní faktor přesnost, dosah, případně vysoká cena nákladu. Použití je například pro sledování lodních kontejnerů, mýtné brány atd. [2].

1.2.2 Wi-Fi (IEEE 802.11)

Jedná se o technologii pro bezdrátovou lokální síť, která je popsána standardy IEEE 802.11, které definují fyzickou vrstvu (PHY) a MAC (Media Access Control) podvrstvu. Tato technologie je založena na využití bezlicenčního frekvenčního pásma (ISM), díky kterému je mnohem dostupnější širokému množství uživatelů a je dnes široce rozšířena. Nejznámější standardy jsou:

- IEEE 802.11a - Tento standard operuje v pásmu 5 GHz ISM s šířkou kanálu 20 MHz. Maximální přenosová rychlost činí 54 Mbps a používá modulaci OFDM¹.
- IEEE 802.11b - Tento standard operuje v pásmu 2,4 GHz ISM s šířkou kanálu 20 MHz. Maximální přenosová rychlost činí 11 Mbps a používá modulaci DSSS².
- IEEE 802.11g - Tento standard operuje v pásmu 2,4 GHz ISM s šířkou kanálu 20 MHz. Maximální přenosová rychlost činí 54 Mbps a používá modulaci DSSS nebo OFDM. Je zpětně kompatibilní s IEEE 802.11b. Spolu s IEEE 802.11n jsou nejrozšířenějšími Wi-Fi technologiemi současnosti.
- IEEE 802.11n - Tento standard operuje v pásmech 2,4 a 5 GHz ISM s šířkou kanálu 20 nebo 40 MHz. Maximální přenosová rychlost činí 600 Mbps a používá modulaci DSSS nebo OFDM. Navíc podporuje MIMO³ (až 4x4 MIMO) a je zpětně kompatibilní s IEEE 802.11a, b a g.
- IEEE 802.11ac - Tento standard operuje v pásmu 5 GHz ISM s šířkou kanálu 20, 40, 80 nebo 160 MHz. Maximální přenosová rychlosti činí 6933 Mbps a používá modulaci QAM (až 256-QAM⁴). Dále podporuje

¹Orthogonal Frequency Division Multiplex – ortogonální multiplex s frekvenčním dělením.

²Direct Sequence Spread Spectrum – technika přímého rozprostřeného spektra.

³Multiple-Input Multiple-Output – více vstupů více výstupů, použití několika antén k prostorové paralelizaci datových toků.

⁴Quadrature Amplitude Multiplex – kvadrurní amplitudová modulace.

MIMO (až 8X8 MIMO a MU-MIMO⁵) a je zpětně kompatibilní s IEEE 802.11a, n [3; 4].

Od roku 2006 je u všech zařízení s certifikací Wi-Fi Certified vyžadováno zabezpečení WPA2 (IEEE 802.11i), případně jeho různé úpravy (WPA2-Enterprise) [5]. Toto zabezpečení je dále doplněno 128 bitovým AES šifrováním. V minulosti bylo používáno zabezpečení WPA nebo WEP, ale ty jsou dnes již překonány a nejsou považovány za bezpečné.

Díky velkému rozšíření a dobrému pokrytí je Wi-Fi velice vhodná pro použití u IoT věci jako jsou chytré spotřebiče a jiná zařízení pro něž není kritická spotřeba energie.

Značné negativum Wi-Fi je její vysoká energetická náročnost, proto pro zvýšení podpory IoT byl vytvořen nový standard IEEE 802.11ah (Wi-Fi HaLow), který pracuje v tzv. sub-GHz ISM pásmu, kde používá frekvence 863–868 MHz pro Evropu, 902–928 MHz pro USA a několik dalších frekvencí v různých částech světa. Tento standard přináší zlepšení dosahu až na dvojnásobek oproti předchozím verzím a zároveň úsporu energie.

1.2.3 Bluetooth (IEEE 802.15.1)

Jedná se o energeticky nenáročnou bezdrátovou technologii s malými rychlostmi přenosu určenou pro PAN (Personal Area Network), která převážně slouží k připojení periférií k mobilním zařízením, případně spojení mobilních zařízení na krátké vzdálenosti.

Bluetooth pracuje v pásmu 2,4 GHz ISM a je standardizován jako IEEE 802.15.1. Typický dosah je do 10 metrů, u nových standardů (Bluetooth LE) je deklarováno až 100 metrů. Nejznámější standardy Bluetooth jsou:

- Bluetooth 1.1 – Verze použitá pro popsání standardu IEEE 802.15.1. Stejně jako původní verze nabízela přenosovou rychlost až 721 Kbps pro data a navíc až 3 kanály pro hlas.
- Bluetooth 2.0 + EDR – Tato verze přidala EDR (Enhanced Data Rate), čímž zvýšila přenosovou rychlost až na 3 Mbps.
- Bluetooth 3.0 + HS – Tato verze přidala HS (High Speed), který dohodnul přenos a samotný přenos provedl přes rychlý IEEE 802.11 spoj. Tímto se přenosová rychlost zvýšila na více jak 10 Mbps.
- Bluetooth 4.0 + LE – Tato verze zahrnuje tzv. Bluetooth Low Energy (BLE). Přenosová rychlost verze 4.0 se zvýšila až na 25 Mbps [6].

⁵ Multi User MIMO – vysílač je schopen současně komunikovat až se 4 uživateli.

Bluetooth Low Energy, nazývané jako úsporné Bluetooth nebo Bluetooth Smart (chytré Bluetooth). Vysílací výkon se pohybuje mezi 0,01 mW až 10 mW a zároveň se zvyšuje maximální dosah až na 100 metrů [7].

Standard BLE byl intenzivně vyvíjen výrobcí mobilních telefonů, a proto je dnes dostupný ve většině nově prodávaných zařízení. Jeho využitelnost je v komunikaci mezi vozidly (Vehicle-to-Vehicle), v senzorických sítích anebo pro wearables (nositelná elektronika). Při srovnání efektivity přenášených dat vychází BLE lépe než ZigBee [8].

1.2.4 ZigBee

ZigBee technologie byla vyvinuta jako standard pro aplikace vyžadující nízkou spotřebu elektrické energie, nízkou cenu a malý datový tok. Tato technologie je založena na standardu IEEE 805.15.4, který byl vytvořen pro řídicí a senzorické sítě.

Standard ZigBee je spravován ZigBee Alliancí (ZigBee Alliance), která mimo jiné provádí certifikaci ZigBee zařízení. ZigBee pracuje v ISM pásmech a jeho přenosová rychlost se odvíjí od použitého pásma, viz tab. 1.1.

Tab. 1.1: Přenosová rychlost podle frekvenčního pásma [9].

Kmitočet [MHz]	Maximální rychlost [Kbps]
868	20
915	40
2 400	250

ZigBee používá DSSS modulaci, kterou doplňuje BPSK⁶ kódováním, případně O-QPSK⁷ u 2,4 GHz ISM. Aby se zredukovala šance na kolize při komunikaci více koncových zařízení v síti se používá CSMA/CA⁸.

ZigBee dále přebírá ze standardu IEEE 802.15.4 topologie zapojení: do hvězdy (Star) a do mřížky (Mesh), viz obr. 1.1. Zatímco v zapojení do hvězdy musí všechny koncové prvky komunikovat přímo s centrálním prvkem (koordinátor, brána), tak v zapojení do mřížky mohou být zařízení napojena přes několik mezilehlých koncových zařízení. Každé zařízení si udržuje směrovací tabulku, díky které může při výpadku mezilehlého prvku zvolit alternativní cestu k cíli, tímto je zajištěna redundance spojů. Jedna síť je schopna pojmout až 65 tisíc účastníků [8; 9].

⁶ Binary-Phase Shift Keying – binární-fázové klíčování.

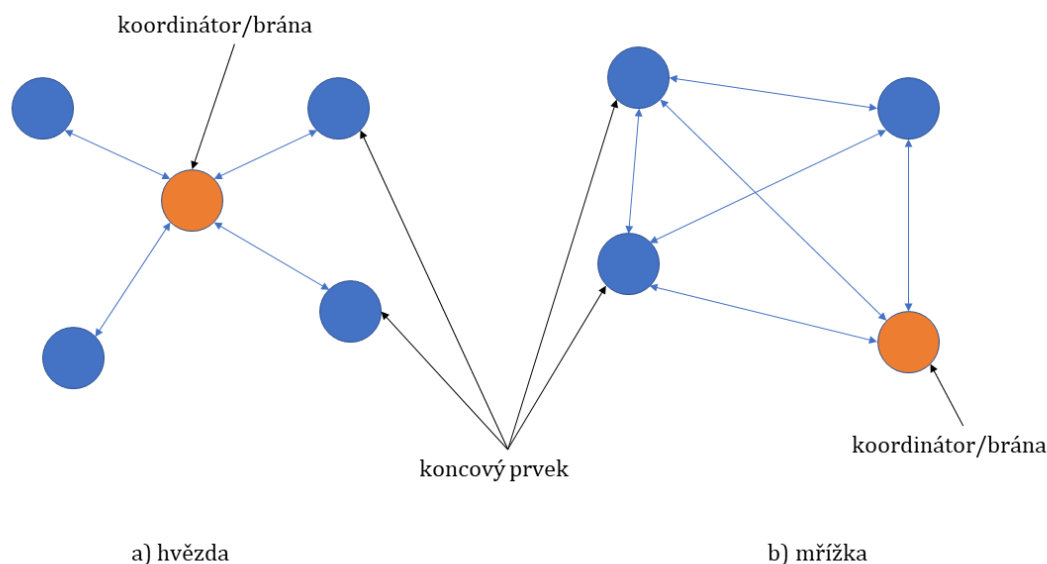
⁷ Offset Quadrature-Phase Shift Keying – posunuté kvadrurní fázové klíčování.

⁸Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance – metoda vícenásobného přístupu s nasloucháním nosné.

Výstupní výkon se pohybuje od 1 do 100 mW v závislosti na vysílači s obvyklým dosahem mezi 10 až 100 metry mezi jednotlivými zařízeními. Aby ZigBee zajistil nízkou spotřebu elektrické energie podporuje uspání zařízení s dlouhými intervaly spánku (až v řádu dní). Navíc umožňuje probudit zařízení s malou časovou prodlevou (15 ms pro náběh prvku do plného provozu, 30 ms pro připojení prvku k síti).

Technologie ZigBee se dělí na ZigBee a ZigBee Pro, který je cílený na podporu mřížového zapojení s tisíci zařízení v síti a je určen pro IoT. Pro zajištění zabezpečení dat je použito 128 bitové AES šifrování a mechanismus generování bezpečnostního klíče, případně je možnost použít přístupová pravidla (ACL, Access Control List). Dále nabízí podporu IP sítě připojením brány, která provádí překlad [10].

Očekávané použití ZigBee pro IoT je v domácí automatizaci (Smart Home) a pro senzorické sítě.



Obr. 1.1: Topologie zapojení [10].

1.2.5 Mobilní sítě

Velký potenciál využití pro IoT mají mobilní sítě, které svým pokrytím zabezpečují téměř bezproblémové aplikování různých řešení s minimem nákladů. Navíc díky zavedeným roamingovým službám není obtížné přemístit zařízení jinam bez vlivu na funkčnost a složitost s dodatečným nastavením. Mobilní sítě na rozdíl od dříve zmíněných technologií pracují v licencovaných pásmech, čímž zajišťují mnohem lepší předvídatelnost přenosových parametrů a vzájemného rušení.

Organizace 3GPP (3rd Generation Partnership Project), která se stará o standardy mobilních sítí zapracovala několik technologií pro tzv. MTC (Machine-Type Communication, strojovou komunikaci), jenž přináší podporu pro IoT a rozsáhlé sítě plné senzorů a dalších strojů. V současné době jsou nejznámější tyto technologie:

EC-GPRS (Extended Coverage General Packet Radio Service)

Tato technologie je založena na GPRS/EGPRS (Enhanced GPRS) a využívá toho, že zařízení podporující GPRS jsou velice levná, dostupná. Navíc je GPRS velice rozšířen, čímž odpadají náklady na vybudování infrastruktury. V porovnání s EGPRS tato technologie přináší zvýšenou bezpečnost podobnou úrovni zabezpečení LTE, zvýšené pokrytí (až o 20 dB), zjednodušení celého zařízení a lepší úsporu energie. Současně EC-GPRS zvyšuje kapacitu zařízení na jednu buňku až na 5 tisíc.

LTE (Long Term Evolution)

Do této technologie spadá několik kategorií, které definují změny provedené za účelem použití v IoT. Všechny tyto kategorie jsou kompatibilní s LTE architekturou.

- Cat-1, Cat 0 – Zaměřují se na redukci spotřeby energie (navazování spojení pouze při potřebě přijímače nebo vysílače), ceny zařízení a rozšiřitelnost pro IoT (podpora až několika milionu zařízení na jednu buňku). V Cat-1 byla redukována maximální přenosová rychlost na 10 Mbps. Zatímco v Cat-0 byl zvýšen dosah až o 15 dB a prostupnost pevnými překážkami.
- Cat-M1 – Dále redukuje přebytečné funkce z LTE a je dále optimalizován pro aplikace s málo frekventovanými malými zprávami, malým datovým tokem. Oproti Cat-1 a Cat-0 dále redukuje frekvenční pásmo z 20 MHz na 1,4 MHz a redukuje přenosovou rychlost na 375 Kbps v half-duplex režimu. Navíc podporuje VoLTE (Voice over LTE, hlas přes LTE), čímž je lze použít pro zdravotnické a bezpečnostní aplikace (panely alarmů atd.) [11; 12].

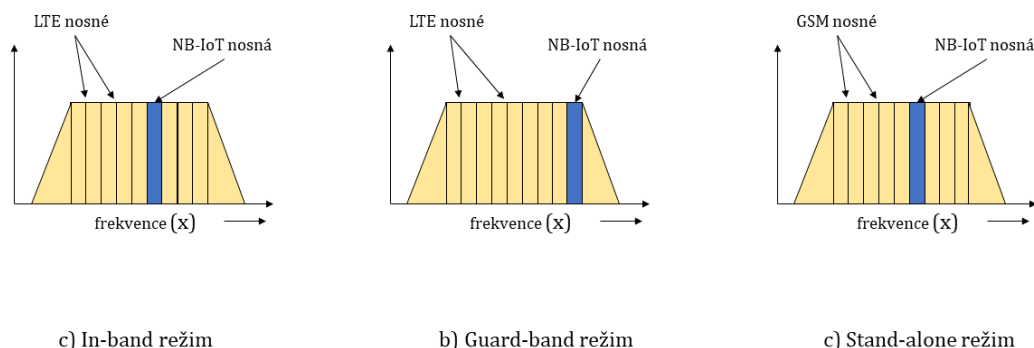
NB-IoT (NarrowBand IoT)

Známé také jako LTE Cat-NB1, je součástí standardu LTE, ale není s ním zpětně kompatibilní. NB-IoT používá šířku pásma 180 kHz s 10 kHz ochrannými intervaly. Nemá jasné definované frekvenční pásmo, protože využívá část pásma LTE, příp. GSM, v závislosti na dostupných prostředcích. Režimy jsou definovány takto:

- In-band – V tomto režimu NB-IoT pracuje v pásmu LTE sítě, tak že využívá pouze definovaných 200 kHz z celkového pásma, viz obr. 1.2 a). Využívaná část pásma není pevně stanovena a může se měnit s potřebami LTE sítě.
- Guard-band – V tomto režimu NB-IoT využívá ochranných pásem LTE sítě, která jsou jinak nevyužita, viz obr. 1.2 b).
- Stand-alone – V tomto režimu NB-IoT pracuje v určeném pásmu GSM sítě, viz obr. 1.2 c). Tento režim je vhodný pro oblasti, kde je stále dostupné GSM, a přitom je již poskytováno LTE.

NB-IoT je technologie určená pro jednoduché, nenáročné přenosy dat s minimem dodatečných funkcí.

Předpokládané využití pro IoT je převážně v aplikacích vyžadujících nízkou odezvu, vysokou kvalitu přenosu a definovaný QoS (Quality of Service, kvalitu služeb). Tímto jsou předurčeny k průmyslovým aplikacím pracujícím v reálném čase (vzdálená správa strojů atp.), případně jako prostředník pro přenos dat z IoT postavených na krátkodosahových technologiích (Bluetooth, ZigBee atd.). Další možnost použití je díky velkému pokrytí v chytrých měřicích spotřeby (Smart metering; elektrické energie, plynu, vody atd.), v chytrých městech (Smart city) pro ovládání osvětlení, oznámení o počtu parkovacích míst atp. [13; 14].



Obr. 1.2: Pracovní režimy NB-IoT [14].

1.2.6 Z-Wave

Fyzická vrstva (PHY) a MAC podvrstva Z-Wave technologie jsou založeny na standardu ITU-T G.9959, který specifikuje použitá frekvenční pásma, modulaci a demodulaci, kódování a přístupové metody [15]. Celý standard je zaštitován organizací Z-Wave Alliance, která se stará o dodržování standardů a propojení jednotlivých výrobců.

Standard ITU-T G.9959 specifikuje pracovní frekvenci zařízení v bezlicenčních pásmech (ISM), konkrétně 908,4 a 916,0 MHz pro USA, 868,4 a 869,85 MHz pro Evropu s šířkou pásma 300 nebo 400 kHz [16].

Zařízení pracují podle standardu ITU-T G.9959 v mřížkové (Mesh) topologii (obr. 1.1 b)) a zároveň umožňují komunikaci mezi jednotlivými zařízeními. Této vlastnosti Z-Wave využívá k přeposílání požadavků v případě, že je signál mezi prvky příliš slabý. V současné době je umožněno posílat požadavky přes až 3 mezilehlá zařízení s maximálně 232 zařízeními v jedné síti. Deklarovaný teoretický dosah dvou zařízení činí až 100 metrů, při přeposílání požadavků mezi zařízeními lze dosáhnout až 200 metrů. Přenosová rychlost je 9,6 a 40 Kbps.

Síť Z-Wave zařízení je složena s centrálního prvku (tzv. hub, brána) a koncových prvků. Uživatel pošle požadavek pomocí mobilní aplikace na hub, který je připojený do domácí sítě stejně jako uživatel. Hub následně pošle požadavek na nejvhodnější zařízení v cestě k cíli. K směrování požadavků si buduje směrovací tabulku pouze centrální prvek, který nové zařízení požádá o jeho sousedy při inicializaci a z těchto údajů je následně vytvořen směrovací záznam.

Z-Wave je dnes dostupný ve dvou verzích Z-Wave a Z-Wave plus, přičemž jsou obě verze mezi sebou zpětně kompatibilní. Největší rozdíl mezi těmito verzemi je, že plus verze od počátku vyžaduje použití 128 bitového AES šifrování.

Bezpečnost je u Z-Wave řešena asociací unikátních identifikačních čísel každému prvku (NodeID) a navíc asociace zařízení včetně centrálního prvku do unikátní domácí sítě (HomeID). Dále je zde u verze Z-Wave volitelná možnost použití 128 bitové šifrování AES [15; 16].

Očekávané použití v IoT je v chytrých domech (Smart Home), kde spojí jednotným standardem jednotlivé prvky (světla, zámky, klimatizace atd.).

2 LPWAN

Podstatou LPWAN (Low Power Wide Area Network) sítí je cíl na nízkou spotřebu s pokud možno, co největším dosahem. Většina LPWAN technologií pracuje v bezlicenčních pásmech (ISM): 2,4 GHz, 868 MHz, 915 MHz, 433 MHz a 169 MHz v závislosti na zemi použití. Pro Evropu je typicky použit kmitočet 868 MHz.

Oproti dříve zmíněným technologiím jsou LPWAN technologie většinou v zapojení hvězda (Star), tedy že centrální prvek (Gateway, brána) je pouze jeden skok od koncových zařízení (End-node) a tedy není zde žádná forma přeposílání požadavků přes mezilehlé prvky. Tato vlastnost šetří počet zařízení nutných k sestavení celé sítě, zjednodušuje její infrastrukturu, ale naopak vnáší požadavek, aby koncová zařízení byly trvale v dosahu centrální jednotky.

V této kapitole bude rozebráno několik typických zástupců LPWAN, u kterých budou popsány jejich principy činnosti, jejich hlavní rozdíly, a také typická aplikace.

2.1 Sigfox

Sigfox technologie spadá pod stejnojmennou francouzskou společnost, která nabízí celé řešení IoT technologie. Tato technologie je na trhu nejdéle ze všech LPWAN technologií, a proto je nejvíce rozšířena a odladěna.

Sigfox používá model sítě podobný buňkovým (mobilním) sítím, tedy že nabízí přenosovou infrastrukturu s kvalitním, všudypřítomným pokrytím a koncového uživatele účtuje za každé připojené zařízení.

Sigfox používá Ultra-Narrow Band technologii (UNB) a stejně jako jiné LPWAN používá bezlicenční ISM pásma. V Evropě pracuje na frekvenčním pásmu 868 MHz (konkrétně od 868,034 do 868,226 MHz) a v USA na 915 MHz. Tyto pásma dělí do 100 Hz kanálů, čímž získává až 400 kanálů pro vysílání. Díky použití velmi malého přenosového kanálu je ovlivnění šumem velice malé a systém je schopen přijímat a úspěšně demodulovat signál s přijatým výkonem pouze -142 dBm [17].

Vzhledem k tomu, že komunikace je vždy inicializována koncovým zařízením a nejsou použity potvrzovací zprávy, tak aby bylo zajištěno, že zpráva dorazí k přijímači (Base station) je posílána celkem třikrát pokaždé na jiné frekvenci, aby se zajistilo korektní přijetí alespoň jedním přijímačem v dosahu. Naopak základnová stanice skenuje současně všechny potenciální kanály a dekóduje přijaté zprávy.

Protože není předem známa zbytku sítě frekvence, kterou koncový prvek použije a je závislá na zařízení (oscilátor, náhodný výběr frekvence), tak lze považovat rozložení využití kanálů za rovnocenné a není nutné je předem definovat. Této technologii přístupu ke kanálu se říká Random Frequency Division Multiple Acces (R-FDMA) a díky této metodě je náročnost na přesnost a kvalitu komponent u

koncových prvků, převážně oscilátoru, výrazně nižší, jenž přináší nižší celkovou cenu zařízení, což je velice důležité u koncových prvků v IoT.

Pro zamezení nepřetržitého vysílání jednoho zařízení, a tedy rušení ostatních účastníků je jak v Evropě, tak v USA omezený maximální čas nepřetržitého vysílání zařízení. Tento maximální čas vysílání se nazývá duty cycle (pracovní cyklus) a v Evropě je stanoven na 1 %, tedy že zařízení bude vysílat pouze 1 % času. Na základě těchto omezení je stanoven maximální počet zpráv pro jedno zařízení na:

- 140 odeslaných (Up-link) zpráv za den na zařízení (necelých 6 zpráv za hodinu),
- garantované⁹ 4 přijaté (Down-link) zprávy za den na zařízení [18].

Sigfox pracuje s přenosovou rychlostí 100 bps a udávané teoretické dosahy jsou okolo 30 až 50 km ve venkovských oblastech a okolo 3 až 10 km v městských oblastech.

Struktura odesílaného rámce je složena z preamble o velikosti 4 bajtu, která slouží k synchronizaci přijímače, dále rámec obsahuje 4 bajty odpovídající unikátnímu identifikačnímu (ID) číslu zařízení, které je použito jako adresa odesílatele. Poté následuje odesílání zprávy o velikosti až 12 bajtů, která obsahuje uživatelská data. Nakonec rámec doplňuje 2 bajtové CRC¹⁰ pole a otisk dat, který je generován ze soukromého klíče, který má každý koncový prvek v sobě uložen a je použit pouze pro autentizaci dat na straně příjemce [19]. Pro přijetí zpráv koncovým prvkem je vždy po dokončení odeslání dat otevřeno přijímací okno (Reception-window), během kterého může základnová stanice poslat data ke koncovému prvku.

Protože přenos pokaždé zahajuje koncový prvek, tak přijímané zprávy nelze považovat za zprávy v reálném čase, a proto se tento typ komunikace nehodí pro úlohy citlivé na zpoždění a je spíše vhodný pro chytré měřiče (Smart meter), sledovací zařízení (chytré obojky pro zvířata, poloha vozidla), případně další aplikace nenáročné na velikost a četnost odesílaných a přijímaných dat.

Pro zajištění bezpečnosti Sigfox implementuje spoustu kroků, některé přímo na koncových zařízeních, jiné až na vlastních serverech. Nejdůležitější kroky na koncových zařízeních jsou:

⁹ Pro základnovou stanici je duty cycle stanoven na 10 %, proto v závislosti na počtu připojených zařízení může být možnost odeslání zpráv vyšší než garantovaná.

¹⁰ Cyclic Redundancy Check – cyklický redundantní součet, hashovací funkce k detekci chyb během přenosu.

- Koncová zařízení nejsou nikdy připojena do veřejné sítě, vždy komunikují přes základnovou stanici, která implementuje velice striktní firewall.
- Každé zařízení má svůj vlastní soukromý kód, kterým pomocí otisku autentizuje zprávu.
- Volitelná možnost šifrovat uživatelská data, případně je na uživateli implementace šifrování dat.
- Používání sekvenčních čísel rámců, čímž se zamezuje falšování rámců [18].

2.2 LoRa

Název LoRa je odvozen zkrácením slov Long Range, tedy komunikace na velkou vzdálenost. LoRa byla od začátku navrhována jako technologie určena ke komunikaci na velké vzdálenosti s malou energetickou náročností a velkou odolností vůči rušení. Požadavek na odolnost vůči rušení je převážně zapříčiněn tím, že LoRa jako i jiné LPWAN technologie pracuje v bezlicenčních ISM pásmech, která jsou mnohem více zarušena než placená pásma.

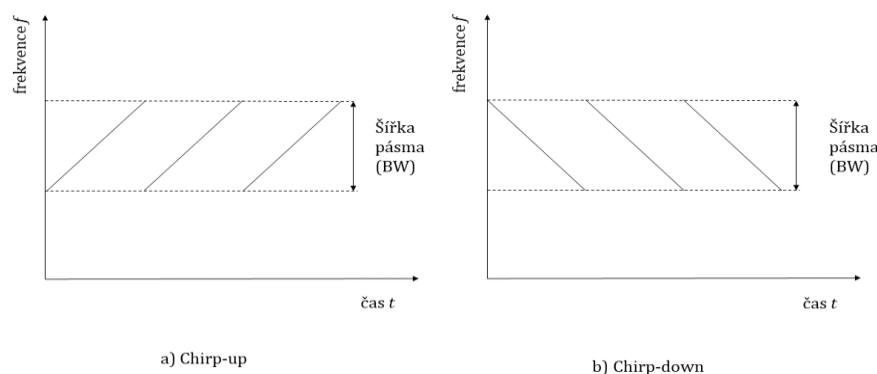
LoRa technologie byla navržena a patentována společností Semtech, která současně působí jako jediný výrobce čipů s LoRa™ modulací.

2.2.1 Fyzická vrstva (PHY) LoRa™

Fyzická vrstva je založena na proprietární modulaci patentované firmou Semtech. Tato modulační technika je založena na modulaci Chirp Spread Spectrum (CSS), která byla původně vyvinuta za účelem použití v radarových aplikacích. V minulosti byla používána armádou pro bezpečnou komunikaci. Její hlavní klady jsou relativně nízké nároky na vysílací výkon a odolnost vůči degradaci kvality kanálu (vícecestné šíření, útlum signálu, Dopplerův jev, rušení v přenosovém pásmu) [20].

Princip Chirp modulace spočívá v tom, že je generován Chirp signál, který lineárně s časem zvyšuje svoji frekvenci od spodní hranice pásma po horní hranici pásma (Chirp-up), anebo svoji frekvenci snižuje (Chirp-down) viz obr. 2.1. Po dosažení horní frekvence se frekvence vrací na spodní hranici a proces se opakuje. Na tento signál je následně přerušováním (chip) modulována přenášená informace.

Díky linearitě chirp pulzů je frekvenční rozdíl mezi vysílačem a přijímačem roven časovým rozdílům, které lze jednoduše eliminovat. Tímto je tato modulace odolná vůči Dopplerovu. Frekvenční rozdíl může být až 20 % šířky pásma (Bandwidth, *BW*) bez vlivu na dekodovací schopnost. Toto pomáhá snížit cenu LoRa modulů, protože výrobci takto nemusí implementovat vysoce přesné krystaly, které zvyšují koncovou cenu.



Obr. 2.1: Průběh frekvence CSS modulace v čase [21].

Jak již bylo zmíněno dříve LoRa pracuje v bezlicenčních ISM pásmech, a to konkrétně na 902-928 MHz v USA, 863-870 MHz v Evropě, případně také může pracovat na nižších frekvencích 433 a 169 MHz. Stejně jako SigFox je regulačními úřady nucen používat duty-cycle, který je určen na 1 % celkového času. Tomuto omezení se vyhýbá podporou komunikace na více kanálech, jenž mu umožňuje provádět delší přenosy dat s respektem duty-cycle. Standardně je regulačními úřady povolený maximální vysílací výkon 14 dBm (25 mW), ale pro pásmo frekvencí 869,40-869,65 MHz je udělena výjimka a je zde povolený duty-cycle až 10 % s vysílacím výkonem 27 dBm (500 mW).

Uživatelsky lze ovlivnit parametry přenosu (citlivost přijímače, přenosová rychlost, protichybový kód) pomocí: šířky pásma (BW), faktoru rozprostření (Spreading factor, SF) a kódového poměru (Code Rate, CR) [21].

Šířka pásma je definovatelná od 7,8 kHz do 500 kHz, typicky je používána hodnota 125 kHz, příp. 250 kHz, která zajišťuje rozumný kompromis mezi přenosovou rychlostí a odolností vůči rušení. Kódový poměr mění poměr datových bitů vůči redundantním bitům u samo opravného kódu (FEC¹¹) viz rovnice 3.1. LoRa používá Hammingův kód ($k+CR, k$), kde k udává počet přenášených datových bitů [22]. Kódový poměr CR může nabývat hodnot od 1 do 4, běžně je doporučovaná hodnota $CR = 1$, tedy FEC kódový poměr 4/5.

$$FEC \text{ kódový poměr} = \frac{4}{4+CR} \quad (3.1)$$

Každý přenášený symbol se skládá z 2^{SF} chirpů, které pokrývají celé frekvenční pásmo. Faktor rozprostření odpovídá počtu datových bitů, které jsou zakódovány do jednoho symbolu. Z toho lze odvodit rovnici pro výpočet nominální přenosové rychlosti R_b v bitech za sekundu viz rovnice 3.2.

¹¹ Forward Error Correction – dopředný korekční kód.

$$R_b = SF \cdot \frac{4}{\frac{4+CR}{2^{SF} BW}} \quad (3.2)$$

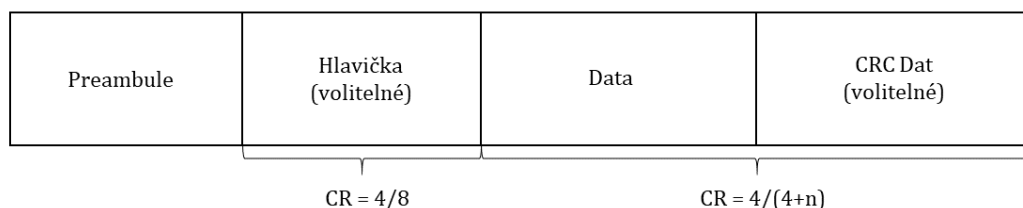
Závislost citlivosti přijímače a přenosové rychlosti na zvoleném SF je ukázána v tab. 2.1.

Tab. 2.1: Porovnání přenosové rychlosti a citlivosti LoRa™ modulace a FSK modulace [20].

Režim přenosu		Šířka pásma [kHz]	Přenosová rychlost [kbps]	Citlivost přijímače [dBm]
FSK			1,200	-122
LoRa	$SF = 6$	125	9,375	-118
	$SF = 7$	125	5,468	-123
	$SF = 8$	125	3,125	-126
	$SF = 9$	125	1,757	-129
	$SF = 10$	125	0,976	-132
	$SF = 11$	125	0,537	-134,5
	$SF = 12$	125	0,293	-137

LoRa™ fyzický rámec - Součástí čipu je předprogramovaný fyzický rámec, který se skládá z několika základních prvků viz obr. 2.2. Rámec začíná preambulí, která je složena ze sekvence několika konstantních Chirp-up. Díky této sekvenci se přijímač synchronizuje a dále podle ní zjišťuje, zda je posílaná zpráva cílena jemu. Po preambuli je volitelná hlavička, která v případě povolení je posílána s FEC kódovým poměrem 4/8. Součástí hlavičky je indikátor velikosti dat v bajtech (velikost pole je 1 bajt, tedy maximum přenášených dat je teoreticky 255 bajtů), použitý kódový poměr pro zbytek přenosu a zda rámec obsahuje 16 bitový CRC¹⁰. Hlavičku je možné vypnout v případech, kdy jsou délka dat, kódový poměr a CRC známy předem.

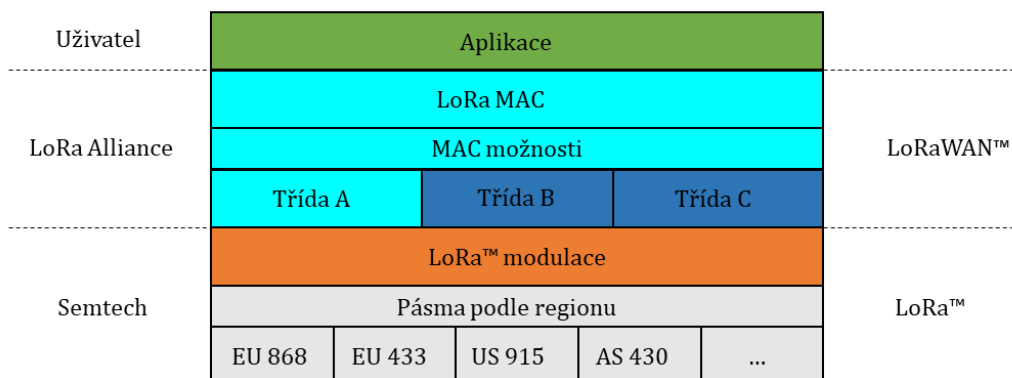
Díky tomu, že je LoRa založen na rozprostřeném spektru, tak jsou při použití odlišných SF jednotlivé signály vůči sobě ortogonální, proto mohou současně probíhat vysílání až na 7 kanálech. Tímto může základna (Gateway) přijímat současně až od 7 různých zařízení [21].



Obr. 2.2: Struktura LoRa™ fyzického rámce [21].

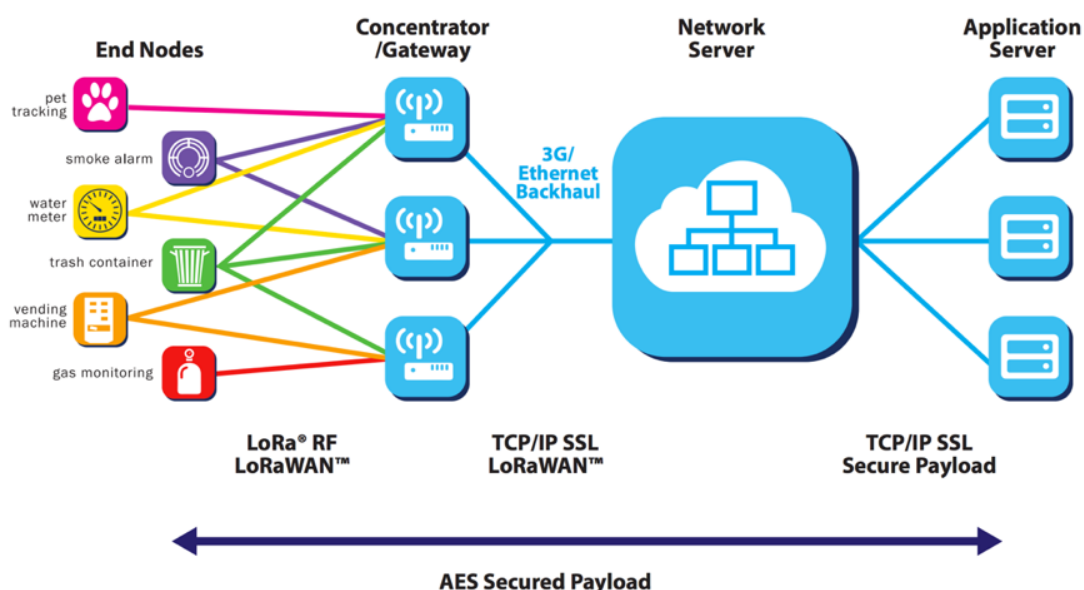
2.2.2 LoRaWAN™

Zatímco LoRa™ je proprietární a pracuje na fyzické vrstvě, tak LoRaWAN™ je otevřený a jeho správcem je LoRa Alliance. LoRaWAN™ je komunikační protokol a systémová architektura běžící na vyšších vrstvách. Běžně je tento komunikační protokol spojován s MAC (Media Access Control) podvrstvou ISO/OSI modelu viz obr. 2.3.



Obr. 2.3: Struktura LoRa technologie z hlediska ISO/OSI modelu [22].

Topologie LoRaWAN™ sítě je typicky rozložena do hvězdy-hvězd (Star of Stars), kde jsou jednotlivé koncové prvky (End-node) zapojeny přes jediný skok k jedné nebo více branám (Gateway). Tyto brány obdržené zprávy přeposílají pomocí běžných síťových technologií (mobilní sítě, ethernet atd.) na síťový server (Net-Server). Funkce tohoto serveru jsou filtrování duplicitních zpráv z více bran, vyhodnocení dat a případné posílání odpovědí zpět na koncový prvek. Většinou je hlavní kritérium pro výběr brány pro posílání odpovědi nejlepší síla signálu. Vybraná brána poté požadavek při první příležitosti předá cílovému zařízení. K síťovému serveru jsou dále připojeny servery aplikací, které pracují se získanými daty viz obr. 2.4. Z těchto vlastností vyplývá, že dva koncové prvky spolu nemohou komunikovat přímo, ale pouze přes Net-server. Vzhledem k tomu, že koncová zařízení logicky komunikují s Net-serverem, tak bránu považují za transparentní [23]. Tato vlastnost přináší zjednodušení celé sítě při přemístění nebo pohybu koncových prvků, případně rozšiřování sítě pouhým přidáním prvků.



Obr. 2.4: Struktura LoRaWAN™ sítě [23].

LoRa třídy zařízení - V LoRaWAN™ síti se zařízení dělí do několika kategorií podle operujících režimů.

- Třída A – Tuto kategorii musí podporovat všechny zařízení v LoRaWAN™ síti. Vysílání vždy zahajuje koncový prvek, jakmile má připravenou zprávu. Po odeslání zprávy koncové zařízení otevírá alespoň dvě přijímací okna (Reception-window) v kterých vyčkává pro příchod jakýchkoliv příkazů nebo dat od Net-serveru. Druhé okno je otevíráno na jiném kanálu, který byl dříve dohodnut s Net-serverem, pro zvýšení odolnosti vůči rušení. Zařízení třídy A jsou především cílená na monitorovací aplikace, kde data nejsou kritická a odezva zařízení nehraje roli. Tato třída je nejúspornější možností v LoRaWAN™ síti.
- Třída B – Tato kategorie specifikuje zařízení, která mají vlastnosti zařízení třídy A. Ale navíc podporují plánovaný dodatečný přijímací časový interval. V pravidelných časových intervalech se probouzí koncové zařízení, aby obdrželo synchronizační zprávu (Beacon) od brány. Díky tomuto řešení Net-server ví, kdy bude koncové zařízení opět dostupné a naslouchat na příjmu. Předpokládaný účel zařízení třídy B je v různých přepínačích a kontrolních prvcích, které vyžadují nižší odezvu a obdržení pravidelných příkazů.

- Třída C – Tato kategorie definuje zařízení, která jsou převážně energeticky neomezená, tedy jsou napájena např. ze síťového zdroje. U těchto zařízení je otevřené přijímací okno téměř trvale, kromě času, kdy posílají zprávu na bránu. Tyto zařízení se hodí pro aplikace, kde odezva hraje hlavní roli a není zde energetické omezení (např. monitorování a správa prvků v továrně) [24].

LoRa MAC - Přístupová metoda přístupu k mediu je u LoRaWAN™ velice podobná metodě Aloha, která je nejvíce používána u technologie Wi-Fi. LoRa se navíc snaží co nejvíce podobat standardu IEEE 802.15.4 od vrstvy MAC a výše. Tímto se zjednodušuje implementace celého protokolu a jeho používání. Za tímto účelem přímo přebírá autentizační mechanismy z IEEE 802.15.4, který používá 4 bajtový kód pro kontrolu integrity zprávy.

LoRa IP - Připojení LoRaWAN™ používá IEEE 64 bitový EUI¹², který automaticky přiřazuje IPv6 adresu každému LoRa koncovému prvku, čímž lze přímo v LoRaWAN™ použít IPv6/6LoWPAN protokoly. Tímto LoRaWAN™ podporuje spojení s IP sítí bez nutnosti dodatečných doplňků.

Zabezpečení v LoRa - LoRaWAN™ byl od počátku navrhován s ohledem na zajištění bezpečné komunikace, proto bylo zavedeno několik vrstev šifrování. Šifrování se nejčastěji dělí na síťovou vrstvu zabezpečení a aplikační vrstvu zabezpečení. Síťová vrstva zabezpečení obstarává autenticitu koncových prvků, zatímco aplikační zajišťuje, že operátor nemá přístup k uživatelským datům.

Aby LoRaWAN™ zajistil bezpečnost přenášených dat implementuje tzv. End-to-end (od začátku do konce) šifrování, kdy je obsah zprávy zašifrován koncovým zařízením pomocí 128 bitového AES šifrování (pomocí AppSKey) a je dešifrován až na síťovém serveru. Tímto je zaručeno, že útočník nemůže průběh komunikace číst. Navíc je implementováno počítadlo zpráv, jenž zamezuje opakovanému přijetí zprávy, která může být snahou útočníka o vložení podvrhnuté zprávy [25]. Pro přidání nového zařízení do sítě existují dvě varianty dohodnutí klíčů.

¹² Extended Unique Identifier – rozšířený unikátní identifikátor.

- Over-The-Air Activation (OTAA) Koncovému prvku i síťovému serveru je nastaven 128 bitový klíč (AppKey). Jakmile se koncové zařízení pokusí připojit k síti, tak tímto klíčem vygeneruje Message Integrity Code (MIC), jehož součástí jsou informace o zařízení (např. identifikační číslo atd.). Síťový server porovná MIC se svým AppKey. V případě shody síťový server vygeneruje nové dva klíče: aplikační relace (AppSKey) a síťové relace (NwkSKey). Tyto klíče poté odešle zpět koncovému prvku zašifrované pomocí AppKey. Koncový prvek přijaté klíče dešifruje a uloží si je pro další komunikaci v síti.
- Activation by Personalization (ABP) V tomto případě jsou koncovému prvku nastaveny klíče: AppSKey a NwkSKey předem. Tento proces je zpravidla proveden výrobcem při výrobě zařízení. Zde je nutné, aby výrobce nastavené klíče bezpečně nainstaloval na síťový server, tak aby byla zajištěna bezpečná komunikace [25].

3 SENZORICKÁ JEDNOTKA

K měření veličin (teplota, vlhkost, tlak atd.) slouží senzorická jednotka. Její náplní je naměřit data pomocí připojených čidel a ty následně předat centrální jednotce. Od centrální jednotky může přijímat příkazy pro plnění dodatečných funkcí (spínání relé).

3.1 Výběr komponent

V rámci semestrální práce byl proveden návrh výběru vhodných komponentů pro senzorickou jednotku. V navazující bakalářské práci bylo sestaveno několik prototypů, na kterých bylo otestováno a odladěno navržené řešení.

Mikrokontrolér (MCU)

Při výběru vhodného mikrokontroléru byly hlavní důvody kladeny na dobrou dostupnost, nízkou cenu a širokou podporu ze strany výrobce a dostupného SW. Nejkritičtější parametry výběru byly spotřeba elektrické energie mikroprocesoru v režimu spánku a kompatibilita s napájecím napětím baterie. Všechny tyto požadavky splnil ATmega328P.

ATmega328P - Jedná se o 8 bitový AVR RISC mikrokontrolér od firmy Atmel. Mikrokontrolér je vybaven 32 kB ISP Flash pamětí se schopností současného čtení a zápisu, dále je zde 2 kB SRAM pro běžící programy, pro ukládání uživatelských dat je integrována 1 kB EEPROM paměť.

Pro komunikaci mikrokontroléru s periferiemi jsou integrovány komunikační sběrnice SPI, I²C a UART. Součástí mikrokontroléru jsou 3 nastavitelné časovače (dva jsou 8 bitové a jeden 16 bitový), interní a externí přerušeni, nastavitelný Watchdog časovač s interním oscilátorem, kterým lze procesor softwarově probouzet v definovaných intervalech. Mikroprocesor také obsahuje 10 bitový analogově-digitální převodník (ADC), který je pro pouzdro PDIP 6 kanálový a pro pouzdra QFN/MLF a TQFP 8 kanálový.

Protože je tento procesor velice hojně používán pro aplikace, kde je podmínka nízké energetické náročnosti, tak je již od výrobce implementováno 5 různých úsporných režimů, mezi kterými lze volně programově přepínat. Mikroprocesor je schopen pracovat na napájecím napětí od 1,8 do 5,5 V, čímž je ideální pro bateriově napájené aplikace.

Pro druhý prototyp byl použit MCU ve vývodovém pouzdře DIP28 (ATmega328P-PU). Pro první prototyp a finální řešení byl použit v SMD pouzdře TQFP32 (ATmega328P-AU) [26].

Tab. 3.1: Technické specifikace ATmega328P [26].

Počet I/O pinů	23
Digitální komunikační sběrnice	UART, SPI, I2C
Časovače	2x 8 bit, 1x 16 bit
Pracovní napětí [V]	1,8-5,5
Maximální frekvence	20 MHz
Programová paměť FLASH [kB]	32
SRAM [B]	2048
EEPROM [B]	1024

LoRa modul

Jak již bylo zmíněno v kap. 2.2 jediným výrobcem čipů je Semtech. Tyto čipy jsou vyráběny v několika verzích a všechny spadají pod označení SX127x. Pro snadnější implementaci jsou několika výrobci implementovány do řešení v podobě modulů, které jsou již připraveny na osazení a okamžité použití.

RN2483 - Tento modul je vyráběn firmou Microchip pod záštitou firmy Semtech. Jedná se o první LoRa modul, který prošel certifikací LoRa Alliance a je certifikován pro LoRaWAN™ 1.0. Kromě samotné LoRa™ modulace tedy modul obsahuje LoRaWAN™ protokol, konkrétně s třídou zařízení A.

Modul komunikuje s MCU pomocí UART protokolu a jeho pracovní napětí je 2,1-3,6 V. Typická spotřeba při vysílání činí 40 mA (pro vysílací výkon 14 dBm na frekvenci 868 MHz) [27].

RFM95/95W¹³ - Tento modul je vyráběn firmou HopeRF. Modul integruje pouze LoRa™ modulaci, proto je mnohem jednodušší a jeho cena je nižší oproti řešení od Microchipu.

Modul komunikuje s MCU pomocí SPI protokolu a jeho pracovní napětí je 1,8-3,6 V. Vysílací výkon je nastavitelný až do 20 dBm, kdy pro 20 dBm je spotřeba 100 mW [28]. Tento modul je velice rozšířen a lze ho zakoupit za velice nízké částky téměř všude.

Vzhledem k tomu, že zadání bakalářské práce stanovovalo použít moduly RFM95, tak byly vybrány tyto moduly. Protože tyto moduly neintegrují LoRaWAN™ protokol, bylo nutné navrhnout a vytvořit vlastní komunikační protokol.

¹³ RFM95W je určen pro světový trh a je CE/FCC certifikován, zatímco bez W, RFM95, je určeno pro čínský trh. Funkčností jsou obě moduly naprosto totožné.

Měřicí čidla

Pro zjednodušení integrace měřicích čidel, snadnou rozšiřitelnost a dlouhodobou stabilitu bylo zvoleno digitální komunikační rozhraní I²C, které je spolehlivé, univerzální a snadno se s ním pracuje.

DS18B20 - Je digitální teplotní čidlo vyráběné firmou Maxim Integrated. Je schopné měřit teplotu od -55 °C do +125 °C s přesností ± 2 °C, při měření od -10 °C do +85 °C s přesností $\pm 0,5$ °C. Měření probíhá ve stupních Celsia a přesnost měření lze uživatelsky definovat, a to od 9 do 12 bitů.

Pro komunikaci s MCU je čidlo vybaveno tzv. sběrnici po jednom drátě (1-Wire bus) a také umožňuje provoz v tzv. parazitním režimu, kdy je čidlo napájeno z komunikační sběrnice a vyžaduje pouze dva přívodní dráty. Každé čidlo má výrobcem definované unikátní 64 bitové sériové číslo, které zajišťuje, že na jedné sběrnici může pracovat více čidel bez obtíží [29].

Tab. 3.2: Technické specifikace DS18B20 [29].

Pracovní napětí [V]	3-5,5
Měřicí rozsah [°C]	-55 až +125 (-10 až +85)
Přesnost[°C]	2 (0,5)
Měřicí čas[ms]	93,75 (9 bit) až 750 (12 bit)
Spotřeba ve spánku (při měření) [μA]	1 (1500)

Tento senzor byl zvolen jako vnitřní teplotní čidlo a také jako jeden z možných modulů pro externí čidlo. V případě použití jako externí čidlo bylo použito čidlo ve vodotěsné verzi, kdy je čidlo zataveno v nerezové trubičce a vybaveno přívodním kabelem.

BMP280 – Je digitální čidlo měřící teplotu a tlak od firmy Bosch Sensortec. Čidlo je schopno měřit tlak v rozsahu 300 až 1100 hPa s relativní přesností $\pm 0,12$ hPa (± 1 m). Teplotu je schopno měřit v rozsahu -40 až +85 °C, v rozsahu 0 až 65 °C s přesností až 0,1 °C.

Díky cílení do sektoru mobilních zařízení a velké škále možných použití, čidlo poskytuje skrze nastavitelné registry rozsáhlé nastavení měření jednotlivých veličin s výběrem vhodné přesnosti měření, převzorkování (oversampling). Krátkodobé rušení lze odfiltrovat pomocí zabudovaného IIR filtru.

Čidlo je schopno komunikovat pomocí směrnic SPI a I²C. Pro komunikaci s MCU byla zvolena sběrnice I²C. Toto čidlo bylo vybráno jako jedno z možných externích čidel [30].

Tab. 3.3: Technické specifikace digitálního čidla BMP280 [30].

Pracovní napětí [V]	1,71-3,6
Měřicí rozsah teploty [°C]	-40 až +85 (0 až +65)
Přesnost měření teploty	16 bit (0,005 °C) až 20 bit (0,0003 °C)
Měřicí rozsah tlaku [hPa]	300 až 1100
Přesnost měření tlaku	16 bit (2,62 Pa) až 20 bit (0,16 Pa)
Spotřeba ve spánku (při měření) [uA]	0,3 (1120)

BH1750FVI – Je digitální čidlo měřící intenzitu světla s největší citlivostí na vlnové délce 560 nm. Sensor je vybaven 16 bitovým převodníkem a součástí čidla je funkce odstraňující rušení světelných zdrojů s frekvencí 50/60 Hz. V závislosti na nastavené měřicí přesnosti může měření trvat 16 ms (s přesností 4 lx) až 120 ms (s přesností 0,5 lx).

Čidlo komunikuje pomocí I²C sběrnice a bylo vybráno jako jedno z možných externích čidel [31].

Tab. 3.4: Technické specifikace digitálního čidla BH1750FVI [31].

Pracovní napětí [V]	2,4–3,6
Měřicí rozsah intenzity světla [lx]	1 až 65 535
Spotřeba při vypnutí (při měření) [uA]	1 (190)

Spínání zátěže

Rozšíření funkcí senzorické jednotky zahrnuje zaimplementování vstupně/výstupních GPIO (digitálních vstupně/výstupních pinů). Pro tuto úlohu bylo zvoleno spínání zátěže.

Vzhledem k požadavku na malý odběr energie modulu bylo zvoleno polarizované relé, které vyžaduje energii pouze v případě přepnutí z jedné polohy do druhé, zbytek času je odběr nulový.

AZ850P2-3 - Jedná se o miniaturní polarizované relé od firmy Zettler Electronics. Relé je vybaveno dvěma cívkami, kde jedna slouží k sepnutí relé (Set Coil) do druhé polohy a druhá (Reset Coil) k navrácení do základní polohy. Výkon nutný k přepnutí relé je maximálně 169 mW při nominálním napětí cívky 3 V. Tímto je relé ideální pro bateriově napájené aplikace [32].

Tab. 3.5: Technické specifikace polarizovaného relé AZ850P2-3 [32].

Nominální napětí cívky [V]	3
Minimální operační napětí cívky [V]	2,3
Odezva sepnutí, vypnutí [ms]	2
Maximální spínaný výkon	30 W nebo 62,5 VA
Maximální spínané napětí [V]	220 DC nebo 250 AC

Napájení

Senzorický modul byl navrhovaný jako bateriově poháněný, kde očekávané pracovní napětí baterie bude 2,5-4,2 V. Vzhledem k tomu, že některé moduly (RFM95, externí I2C sběrnice) vyžadují operační napětí 3,3 V, resp. maximálně 3,6 V. Bylo nutné použít regulátor napětí, který napětí snížil na přijatelnou úroveň.

MCP1700T-3302E/TT - Je lineární stabilizátor s malým úbytkem (Low Dropout), který je schopen dodat až 250 mA. Typický klidový odběr regulátoru je pouze 1,6 μ A, čímž je ideální pro bateriově napájené aplikace. Regulátor byl použit v SMD pouzdře SOT-23 ve variantě s pevným výstupním napětím 3,3 V [33].

Tab. 3.6: Technické specifikace lineárního regulátoru MCP1700 [33].

Vstupní napětí [V]	2,3-6
Výstupní napětí [V]	3,3
Maximální proud [mA]	250
Maximální klidový odběr [μ A]	4

Externí časovač

Pro uspání senzorické jednotky byl ve verzi 2.0 zvolen externí časovač, který zajišťoval ještě nižší odběr proudu senzorické jednotky v režimu spánku. Pro tento účel byl vybrán časovač TPL5110.

TPL5110 – Je nízko odběrový časovač od firmy Texas Instruments. Součástí časovače je podpora pro ovládání MOSFET tranzistoru pro spínání zátěže. Jeho odběr je pouze 35 nA a časový interval lze nastavit od 100 ms do 7200 s pomocí externího odporu. K signalizaci dokončení operace a odpojení zátěže je nutné na signalizační vstup přivést krátký pulz, kterým se zátěž odpojí a začne odpočet nastaveného časového intervalu [34].

Tab. 3.7: Technické specifikace externího časovače TPL5110 [34].

Pracovní napětí [V]	1,8-5,5
Odběr proudu [nA]	35 (na 2,5 V)
Časový interval	100 ms až 7200 s

3.2 Návrh zapojení a DPS

Návrh zapojení byl postaven na volně dostupných schématech zapojení vývojové desky Arduino Pro Mini [35], která byla také zároveň použita pro první prototyp. Na základě výsledků testování prvního prototypu bylo řešení dále optimalizováno a vytvořen druhý prototyp, který již obsahoval všechny kritické funkce finální verze. Na základě provozu tohoto prototypu byly navrženy a vyhotoveny desky plošných spojů.

Aby bylo zajištěno stabilní, nekolísavé napájení pro všechny prvky obvodu, byly přidány blokové kondenzátory: 10 μF k mikrokontroléru a 47 μF k modulu RFM95. Navíc byly na vstup i výstup regulátoru vloženy výrobcem definované filtrační kondenzátory, které by měly zajistit stabilní napětí bez nebezpečí rozkmitání regulátoru a pokrýt skokové odběry zbylých komponentů obvodu.

První dva prototypy byly za účelem testování navrženy bez ochranných prvků (opačná polarita, diody pro spínání induktivní zátěže atd.), jenž byly do výsledného řešení zapracovány.

Tvorba všech schémat a DPS byla realizována pomocí programu Autodesk Eagle, jehož poslední použitá verze byla 9.0.0. K výrobě finálních DPS byla zvolena firma JLCPCB [36] ve standardní výrobě dvouvrstvé desky s tloušťkou měděné vrstvy 35 μm .

První a druhý prototyp

První prototyp se skládal z vývojové desky Arduino Pro Mini, která obsahuje ATmega328P-AU v SMD pouzdře TQFP32. K vývojové desce byl doplněn RFM95 modul připojený skrze adaptér určený pro modul ESP12. Následně byla přidána indikační dioda a teplotní čidlo DS18B20. Při testování vhodných tranzistorů pro spínání zátěže bylo zjištěno, že vlivem nedokonalosti nepájivého pole (přechodovými odpory, parazitní kapacity) a dlouhými přívodními vodiči byly testy neprůkazné.

Proto byl vytvořen druhý prototyp, který byl vytvořen na univerzálním pájivém poli, které odstraňovalo spoustu problémů vyskytujících se u předchozí verze. U druhé verze byl namísto SMD pouzdra použit MCU ve vývodovém pouzdře DIP28. Navíc byl přidán regulátor MCP1700T, s kterým byla změřena první spotřeba ve spánku celého řešení, která byla do 10,8 μA . Změřená hodnota se blížila očekávané spotřebě odhadnuté spotřeby v semestrální práci.

Verze 1.0

Finální navržená deska ve verzi 1.0 byla již osazena MCU v SMD pouzdře TQFP32. Dále přidala ochranné prvky: P-MOSFET tranzistor na vstup napájení sloužící k ochraně proti opačné polaritě. Také byly zapracovány do desky dvě relé se svorkovnicovými terminály pro připojení zátěže. V neposlední řadě byl přidán držák pro Li-Ion baterii velikosti 18650.

Verze 2.0

Oproti verzi 1.0 se liší v použitém časovači, kdy pro verzi 2.0 je použit externí časovač TPL5110 namísto interního Watchdog časovače. Použití tohoto časovače vyžadovalo změny ve schématu i DPS. Hlavní změny byly přidání externího časovače a P-MOSFET tranzistoru, kterým se připojovala/odpojovala celá senzorická jednotka k baterii, tak aby jediný trvalé napájený prvek byl externí časovač. Dále bylo nutné k časovači zapracovat síť rezistorů sloužící k nastavení různých intervalů časovače, tedy spánku jednotky, k jejichž volbě byl vybrán 8 pólový DIP přepínač. V neposlední řadě bylo přidáno další tlačítko, kterým je možné probudit senzorickou jednotku kdykoliv a tím provést okamžité provedení měřicího cyklu.

Schémata a obrázky DPS jsou dostupné v přílohách A a B pro verzi 1.0 a v přílohách C a D pro verzi 2.0. Fotografie osazených desek jsou k dispozici na přiloženém paměťovém mediu.

3.3 Krycí krabíčka

U senzorické jednotky byl předpoklad použití ve vnějším prostředí, kde může působit voda, vítr, vzdušná vlhkost, prach atd. Proto byla pro senzorickou jednotku vybrána průmyslově vyráběná krabíčka s garantovanou odolností vůči vodě a prachu. Za tímto účelem byla vybrána krabíčka Pawbol S-BOX 316 [37], která poskytuje ochranu IP65 a zároveň je dostatečně prostorná pro instalaci konektoru pro externí čidlo, průchodek k relé a konektoru pro anténu.

K připevnění antény byl použit pigtail kabel o délce 15 cm, který byl na jednom konci zakončen RSMA/F konektorem, ke kterému byla z vnější strany krabíčky přímo připevněna anténa. Na druhém konci byl zakončen U.FL (IPEX) konektorem, kterým se nacvakává do konektoru na DPS.

Pro přívod vodičů zátěže k relé byly vybrány dvě průmyslové průchodky, které byly umístěny do spodní části krabíčky, tak aby byly co nejbližší k terminálům od relé a zároveň aby bylo možné přebytečný kabel zátěže uschovat ve spodní části krabíčky, kde je na to připraveno místo. Vzhledem k použitému relé nebyl předpoklad

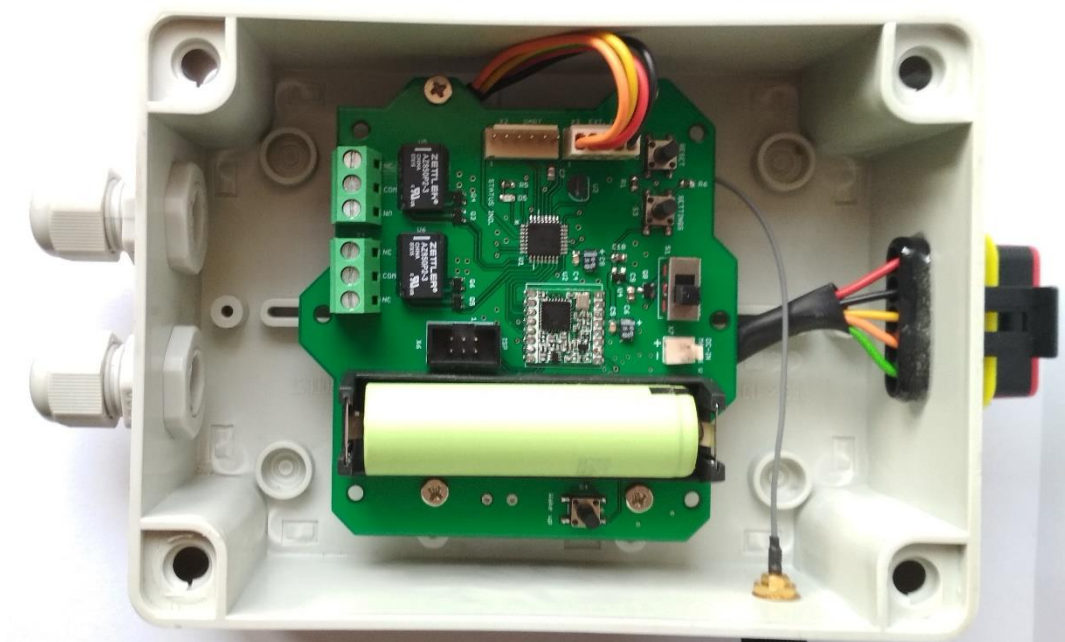
pro spínání velké zátěže, a tedy masivních přívodních kabelů, proto byly vybrány průchodky PG9 splňující všechny uvedené požadavky.

Aby bylo možné připevnit externí čidlo ke krabičce byla do krabičky v horní části vyřezána díra, do které byl zasazen konektor. Ten byl permanentně zafixován pomocí epoxidového lepidla, jenž poskytuje mechanickou pevnost spoje a současně zabraňuje vniku vody a prachu. Jako konektor pro připojení externího čidla byl vybrán TE Connectivity SuperSeal 1.5, který má výrobcem garantovanou odolnost IP67 [38]. Tento konektor byl vybrán převážně proto, že je velice rozšířený v automobilovém průmyslu a proto je jeho cena nízká.

Vzhledem k tomu, že vybraný konektor pro externí čidlo je určen pro spojení kabel-kabel, tak bylo nutné zapracovat na vnější konektor určitou formu krytu do kterého by se skrylo externí čidlo a poskytovalo mu dostatečnou formu ochrany. Za tímto účelem byl vymodelován kryt, který se nasouvá na vnější konektor a chrání čidlo před vnějšími vlivy. Zároveň bylo do krytu zapracováno několik průchodů podle vzoru meteorologických stanic, které poskytují přísun vzduchu a světla dovnitř krytu a zároveň plní funkci primitivního radiačního štítu, kterým chrání čidla před ovlivněním měření od tepelného záření.

Díky průduchům pouze na jedné straně nemusí být umožněna velká přirozená cirkulace vzduchu a tím mohou být výsledky měření nepatrně ovlivněny v případě použití externích čidel měřících vlhkost případně teplotu. Na čidla měřící intenzitu světla či tlak nemusí mít tento design vliv.

Fotografie sestavené krabičky s DPS verze 2.0 je k vidění na obr. 3.1. Další fotografie jsou k dispozici na přiloženém paměťovém mediu.



Obr. 3.1: Sestavená krabička s osazenou DPS senzorické jednotky.

3.4 Firmware

Vzhledem k tomu, že bylo vycházeno ze zapojení vývojové desky Arduino Pro Mini a zároveň aby se zjednodušilo programování, a nebyl potřeba programátor ISP (In-System Programmer), tak byl do mikrokontroléru nahrán zavaděč (Bootloader). Pro první dva prototypy byl zvolen zavaděč pro vývojovou desku Arduino Pro Mini. Pro následný výsledný prototyp byl zvolen zavaděč Optiboot, který podporuje restartování MCU pomocí Watchdog časovače. Po nahrání zavaděče bylo možné mikrokontrolér programovat přímo z vývojového rozhraní pomocí převodníku USB na RS232 TTL (UART).

K tvorbě programů bylo použito vývojové prostředí Atom s rozšířením PlatformIO, které plně nahrazuje originální Arduino IDE a doplňuje je o pokročilé funkce správy kódu.

Arduino ekosystém je výhodný díky široké podpoře komunity, která jej doplňuje o spoustu knihoven, které obsahují již vytvořené podprogramy pro správu a ovládání spousty senzorů, modulů atd.

Průběh činnosti firmwaru

Při probuzení nebo zapnutí senzorické jednotky je nejprve provedena inicializaci, ve které jsou nadefinovány vstupně/výstupní piny. Poté je provedena kontrola stavu baterie, v případě nízkého stavu baterie se přeskočí celý měřicí cyklus a jednotka přejde do režimu spánku okamžitě, aby se zamezilo kritickému podvybití baterie.

Pokud kontrola baterie proběhne úspěšně, přejde se k načtení hodnot nastavení z EEPROM paměti. Následně proběhne kontrola, zda je zapnuta možnost vzdáleného nastavení jednotky nebo zda je stlačeno tlačítko indikující přepnutí do nastavovacího režimu. V případě, že je jedna z možností kladná přejde jednotka do vyčkávacího režimu a bude očekávat vstupní data na sériové lince. Jakmile obdrží data, bude provedeno uložení, resp. neuložení, dat do EEPROM paměti a proběhne reset jednotky. Jestliže není kladný příznak, ani stlačeno tlačítko, tak jednotka přejde ke čtení hodnot z čidel. Poté se data připraví k odeslání a odešlou se pomocí LoRa modulu k centrální jednotce.

Následně bude jednotka vyčkávat po definovanou dobu pro odpověď od centrální jednotky. Jestliže obdrží jednotka odpověď od centrální jednotky, provede vyhodnocení příchozích dat, v nichž bude uveden očekávaný budoucí stav relé (sepnuto/rozepnuto) a zapnutí/vypnutí vzdáleného manuálního nastavení.

Nakonec jednotka provede porovnání nastavení uložených v EEPROM s běžícími, a v případě rozdílu bude do EEPROM uloženo aktuální běžící nastavení. Poté jednotka přejde do režimu spánku, ve kterém setrvá po uživatelem definovanou dobu. Součástí režimu spánku jednotky je uspaní/vypnutí ostatních

částí jednotky a nadefinování GPIO pinů, tak aby byla zajištěna nejmenší možná spotřeba.

Průběh činnosti programu senzorické jednotky je možné vidět na vývojovém diagramu viz obr. 3.2.

Pojistky (Fuses)

Aby se zajistila optimální funkčnost senzorické jednotky bylo nutné upravit pojistky, které upravují nastavení MCU jako je pracovní frekvence, BOD (Brown-Out Detector) atd.

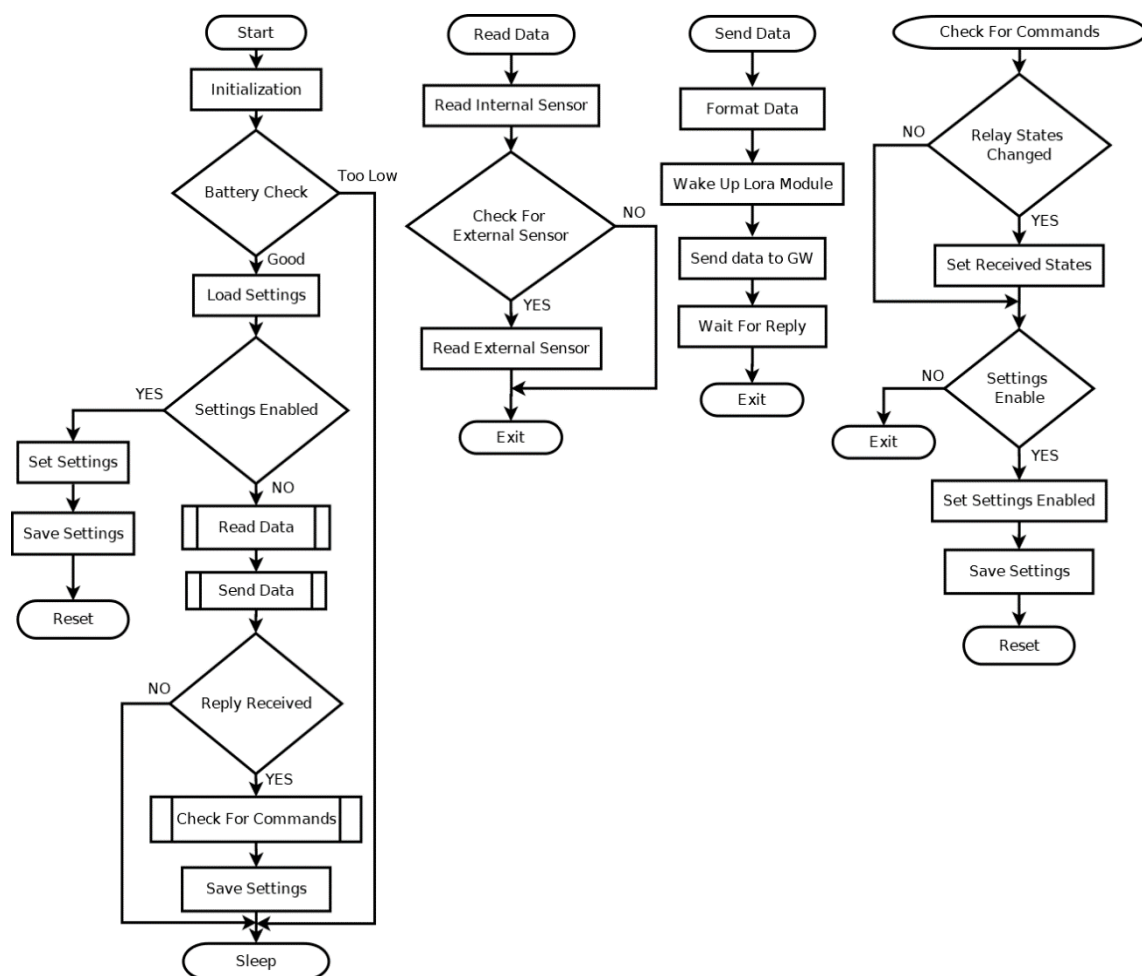
V případě prvního a druhého prototypu byly upraveny pouze rozšířené pojistky (Extended Fuses) kontrolující BOD. V základním stavu byla pro Arduino Pro Mini hodnota rovna 0xFD odpovídající BOD pro 2,7 V. Protože byl předpoklad použití jednotky do napětí až 2,5 V byla hodnota změněna na 0xFE odpovídající BOD pro 1,8 V.

Finální verze měla Optiboot zavaděč, který měl stejně jako Arduino Pro Mini nevhodně nastavené rozšířené pojistky, a proto byly změněny viz výše. Dále zavaděč v základu předpokládal použití interního 8 MHz krystalu namísto externího jako v případě vývojové desky Arduino. Při testování se ukázalo, že interní krystal poskytuje dostatečně kvalitní zdroj kmitočtu pro požadované účely. V případě použití externího krystalu by bylo nutné změnit nízké pojistky (Low Fuses) na hodnotu 0xEF odpovídající externímu 8 MHz krystalu.

Zabezpečení

Při návrhu celého systému bylo bráno v potaz také zabezpečení komunikace. Primární zabezpečení je provedeno již na úrovni rádia pomocí skramblování.

V softwaru je dále celý obsah paketu šifrován. Protože nebyl dostatečný paměťový prostor a pakety byly příliš krátké, tak nebylo možné zvolit pokročilé šifrování např. AES, DES atp. Namísto toho bylo přistoupeno k jednoduchému zabezpečení pomocí logického součtu obsahu paketu s šifrovacím klíčem bit po bitu.



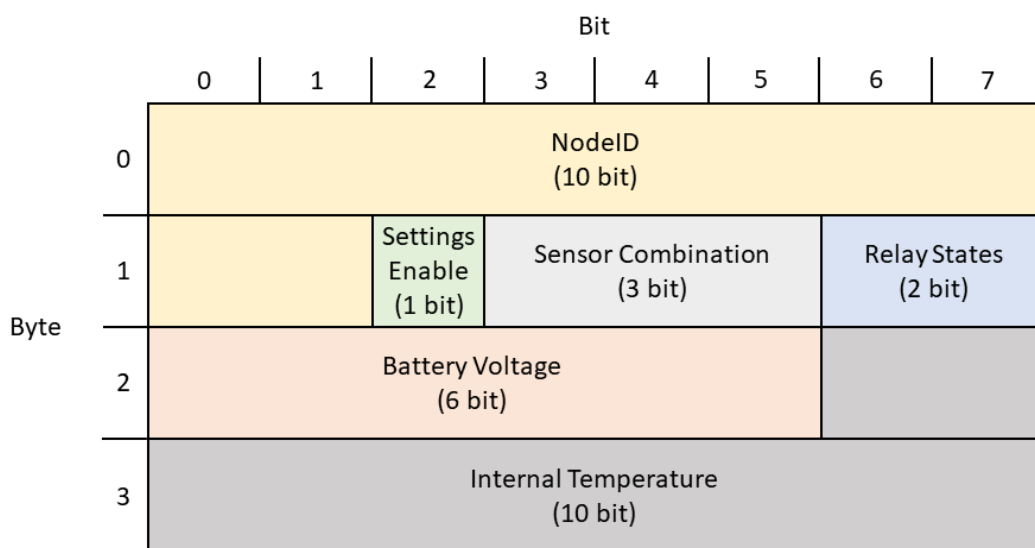
Obr. 3.2: Vývojový diagram průběhu programu senzorické jednotky.

3.5 Struktura datových jednotek

Vzhledem k předpokladu použití více typů čidel jako externí čidlo bylo vhodné datové pakety přizpůsobit požadavkům jednotlivých čidel. V závislosti na použitém externím čidle se proto může měnit velikost datového paketu, tak aby byl přenos co nejkratší a nepřenášely se zbytečně nevyužité/prázdné bity.

Základní datový paket

Bez ohledu na připojené externí čidlo se tento rámec přenáší vždy s tím, že pokud je připojeno externí čidlo, tak je k němu přidá rozšiřující paket a společně jsou vyslány jako jeden rozšířený paket. Strukturu základního datového rámce je možné vidět na obr. 3.3.



Obr. 3.3: Struktura základního datového paketu.

Paket se skládá z 10 bitového NodeID, které je unikátní pro každý prvek v síti včetně centrální jednotky a slouží k jejich identifikaci. Pro použití jsou povoleny hodnoty 10 až 1023, 0 až 9 jsou rezervovány pro speciální případy. Po NodeID následuje 1 bitový příznak indikující manuální vzdálené přepnutí do nastavovacího režimu, kterým senzorická jednotka indikuje jeho aktuální hodnotu. Dále následuje 3 bitová hodnota Sensor Combination, která centrální jednotce dává jasně najevo jak s příchozím paketem nakládat a indikuje jaká kombinace externího čidla je použita. Číselné hodnoty pro jednotlivé kombinace čidel jsou následující:

- při použití pouze interního čidla je hodnota rovna 0,
- pro externí čidlo BMP280 je rovna 1,
- pro externí čidlo BH1750FVI je rovna 2,
- pro případ použití DS18B20 jako externího čidla je rovna 3.

Z dostupných osmy možných kombinací jsou použity pouze čtyři, proto je zde prostor pro budoucí rozšíření o jiná další externí čidla. Po Sensor Combination následuje dvou bitová hodnota Relay States, která každým bitem indikuje stav jednoho ze dvou dostupných relé u každé senzorické jednotky. V případě, že je bit roven 1 je relé ve stavu sepnuto, 0 značí rozepnuté relé.

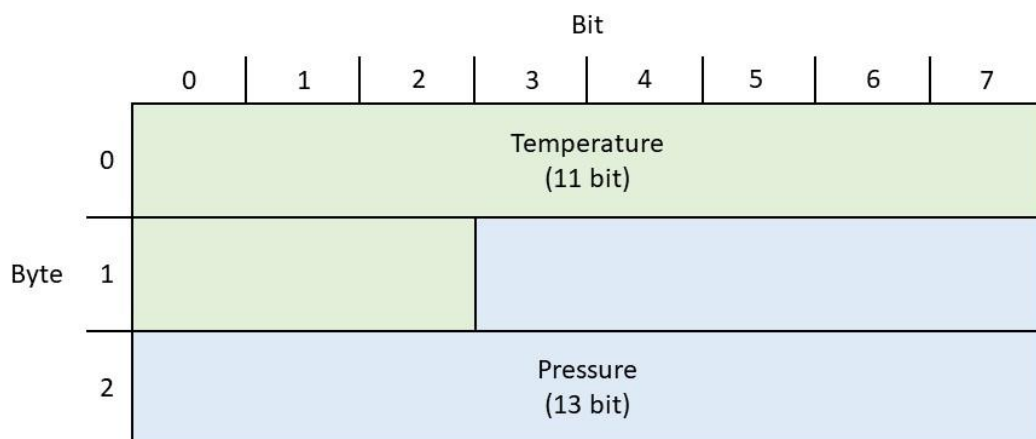
Dále je v paketu přenášena hodnota stavu napětí baterie, která je reprezentována šesti bity. Tato hodnota je výsledkem snahy zredukovat velikost paketu na minimum. Pro redukci byl předpoklad, že baterie může nabývat pouze napětí mezi 2,3 V až 4,3 V. Tento rozsah napětí splňuje i s rezervami požadavky všech dnes dostupných Li-Ion baterií. Aby se zajistila stabilita a minimální závislost

na napájecím napětí baterie byla použita interní napěťová reference ATmega328P čipu s katalogovou hodnotou 1100 mV. Aby bylo možné měřit napětí s touto referencí, byl použit napěťový dělič, který na vstup AD převodníku přivádí pouze ¼ vstupního napětí. Za děličem lze tedy očekávat pro 4,3 V maximálně 1075 mV a pro 2,3 V minimálně 575 mV. Jejich rozdíl dává možný rozsah napětí 500 mV, který lze vyjádřit devíti bity. Při zanedbání nejnižších tří bitů dostáváme výslednou hodnotu Battery Voltage. Díky zanedbání nejnižších tří bitů je možné přenášet nejmenší možný rozdíl napětí baterie rovný hodnotě $7 \text{ (B111)} \cdot 4 = 28 \text{ mV}$.

Zbytek do čtyř bajtů základního paketu tvoří Internal Temperature, který přenáší hodnotu teploty uvnitř senzorické jednotky. Za předpokladu, že senzorická jednotka je schopna maximálně pracovat a měřit v rozsahu teplot -40°C až $+85^\circ\text{C}$ dostáváme maximální možný rozdíl teplot 125°C a při uvažování rozlišení měřené teploty $0,125^\circ\text{C}$ dostáváme požadavek na 7 bitů $+3 \text{ bity} = 10 \text{ bitů}$, jenž splňuje dostupný zbylý prostor do 4 bajtů.

BMP280

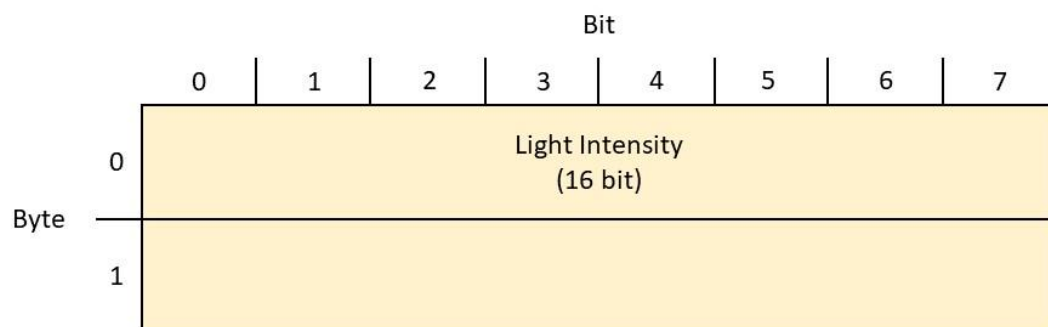
Čidlo BMP280 je schopno měřit teplotu a tlak viz kap. 3.1. Pro měření teploty byl uvažován stejný teplotní rozsah jako u interního čidla, tedy -40°C až $+85^\circ\text{C}$, ale přesnost byla zvýšena na $0,0625^\circ\text{C}$, která odpovídá 4 bitům. Pro měření tlaku byl uvažován celý možný rozsah senzoru 300 až 1100 hPa, jejichž maximální možný rozdíl je 800 hPa, který lze zapsat 10 bity. Při uvažování přesnosti $0,125 \text{ hPa}$, jenž odpovídá přibližně změně o 1 metr nadmořské výšky dostáváme data, která jsou zakódována do rozšířeného paketu pro případ s BMP280 senzorem viz obr. 3.4.



Obr. 3.4: Struktura kódovaných dat pro externí čidlo BMP280.

BH1750FVI

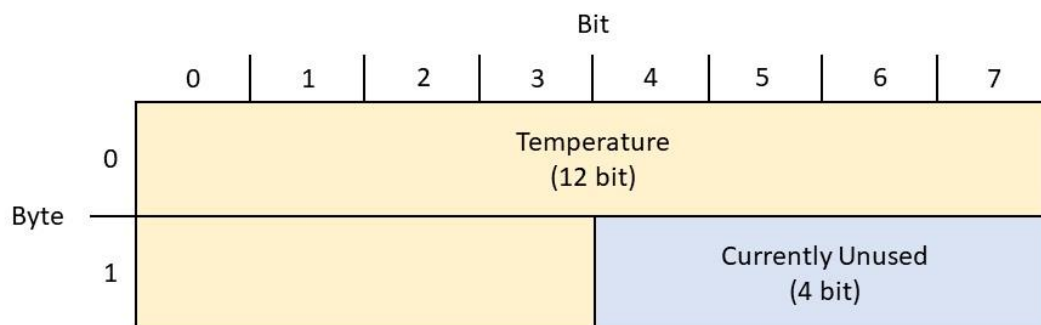
Čidlo BH1750FVI je schopno měřit intenzitu světla v luxech. Jeho výstupní hodnota může být od 0 do 65 535 luxu, která odpovídá rozsahu 16 bitů viz obr. 3.5.



Obr. 3.5: Struktura kódovaných dat pro externí čidlo BH1750FVI.

DS18B20

Čidlo DS18B20 je zároveň použito jako interní teplotní čidlo a je schopné měřit teplotu v rozsahu -40 °C až +85 °C. Pro účel použití jako externí čidlo byla zvolena nejvyšší možná přesnost a to 12 bitů, která odpovídá rozlišení 0,0625° C. Vzhledem k tomu, že je nutné pakety zaokrouhlit na celé bajty, tak zbylé 4 bity do 2 bajtů byly ponechány volné, nepoužité. Strukturu kódovaných dat je možné vidět na obr. 3.6.



Obr. 3.6: Struktura kódovaných dat pro externí čidlo DS18B20.

4 CENTRÁLNÍ JEDNOTKA

K příjmu a zpracování dat vygenerovaných senzorickými jednotkami slouží centrální jednotka, jinak také nazývaná brána. Náplní brány je přijmout pakety od senzorických jednotek, zpracovat je a odpovědět zpět. Brána následně přijatá a zpracovaná data reportuje po sériové lince dále k uživateli.

4.1 Výběr komponent

U centrální jednotky nebyl očekáván specifický požadavek na funkčnost, proto byla postavena na shodných komponentech jako senzorická jednotka viz kap. 3.1.

Mikrokontrolér

Vzhledem k tomu, že nebyly požadavky centrální jednotky odlišné od požadavků senzorické jednotky. Byl pro návrh použit stejný mikrokontrolér.

LoRa modul

Pro zajištění plné kompatibility a jednoduchosti řešení byl použit stejný LoRa modul jako u senzorické jednotky.

Měřicí čidlo

Za účelem rozšířit funkce centrální jednotky bylo přidáno teplotní čidlo DS18B20 v pouzdře TO-92 k měření teploty uvnitř a v okolí centrální jednotky.

Displej

Aby bylo možné jednoduše zjistit stav centrální jednotky, byl do řešení centrální jednotky zintegrován malý OLED displej. Tento displej slouží pouze k zobrazení aktuálního stavu a několika informací o přijímaných paketech. Dále také sloužil k ladění programu centrální jednotky a k zobrazení informací při testování.

OLED displej - Byl vybrán monochromatický 1,3“ OLED displej s rozlišením 128x64 pixelů. Pracovní napětí je 2,8-5,5 V při maximální spotřebě 80 mW. Řadič displeje je SH1106 a s MCU komunikuje pomocí I²C sběrnice [39].

Napájení

U centrální jednotky byl předpoklad, že bude napájena pomocí síťového adapterů. Proto pro zjednodušení výběru napájecího adaptéru byl zvolen regulátor s dostatečně vysokým vstupním napájením, aby se zamezilo nevhodnému použití či

nehodám. Napájecí vstup byl realizován pomocí standardního konektoru DC jack 5,5/2,5 mm.

LM1117IMP-3.3 - Je lineární stabilizátor s nízkým úbytkem napětí (LDO, Low Dropout), který při maximálním odběru 800 mA má typický pokles napětí o 1,2 V. Pro všechny verze centrální jednotky byl použit regulátor v SMD pouzdře SOT-223-4 [40].

Tab. 4.1: Technické specifikace LM1117IMP-3.3 [40].

Maximální vstupní napětí [V]	20
Výstupní napětí [V]	3,3
Maximální výstupní proud [mA]	800
Maximální pokles napětí [V]	1,3

4.2 Návrh zapojení a DPS

Návrh zapojení centrální jednotky byl postaven na volně dostupných schématech zapojení vývojové desky Arduino Pro Mini [35] stejně jako senzorická jednotka.

Aby bylo zajištěno stabilní, nekolísavé napájení pro všechny prvky obvodu, byly přidány blokovací kondenzátory: 10 μF k mikrokontroléru a 47 μF k modulu RFM95. Navíc byly na vstup i výstup regulátoru vloženy výrobcem definované filtrační kondenzátory, které by měly zajistit stabilní napětí bez nebezpečí rozkmitání regulátoru a pokrýt skokové odběry zbylých komponentů obvodu. Aby se zamezilo připojení napájecího napětí opačné polaroty byla na vstup za konektor přidána křemíková dioda.

Nejprve byl sestaven prototyp na nepájivém poli a po ověření jeho spolehlivé funkčnosti byly navrženy a vytvořeny desky plošných spojů.

Tvorba všech schémat a DPS byla realizována pomocí programu Autodesk Eagle, jehož poslední použitá verze byla 9.0.0. K výrobě finální DPS byla zvolena firma JLCPCB [36] ve standartní výrobě dvouvrstvé desky s tloušťkou měděné vrstvy 35 μm .

První prototyp

První návrh senzorické jednotky byl postaven na vývojové desce Arduino Pro Mini, ke které byl připojen rádiový modul RFM95 skrze adaptér určený pro modul ESP12. K tomuto zapojení bylo přidáno tlačítko plnící funkci přepnutí do nastavovacího režimu a také bílá LED dioda pro indikaci stavu jednotky. V neposlední řadě byl přidán malý OLED displej, který sloužil k zobrazení ladících informací a testovacím účelům. Pro jeho první testy byl použit displej s řadičem SH1106, který komunikoval skrze SPI sběrnici. Při testech se ale zvolená sběrnice displeje chovala nespolehlivě

a narušovala činnost rádiového modulu. Proto byl do finální verze zvolen displej vybavený stejným řadičem, ale komunikující pomocí I²C sběrnice.

Finální deska

Osazení komponenty bylo shodné s první prototypem, kromě přidání dodatečné funkcionality v podobě teplotního čidla DS18B20, které v pravidelných intervalech měří teplotu centrální jednotky a jejího okolí. Pro připojení antény k desce byl zvolen SMD konektor s 45° zahnutím, tak aby se mohl snadno zakomponovat do výsledné vytištěné krabičky.

Schéma a obrázky DPS jsou dostupné v příloze E a F. Fotografie osazené desky jsou k dispozici na přiloženém paměťovém mediu.

4.3 Firmware

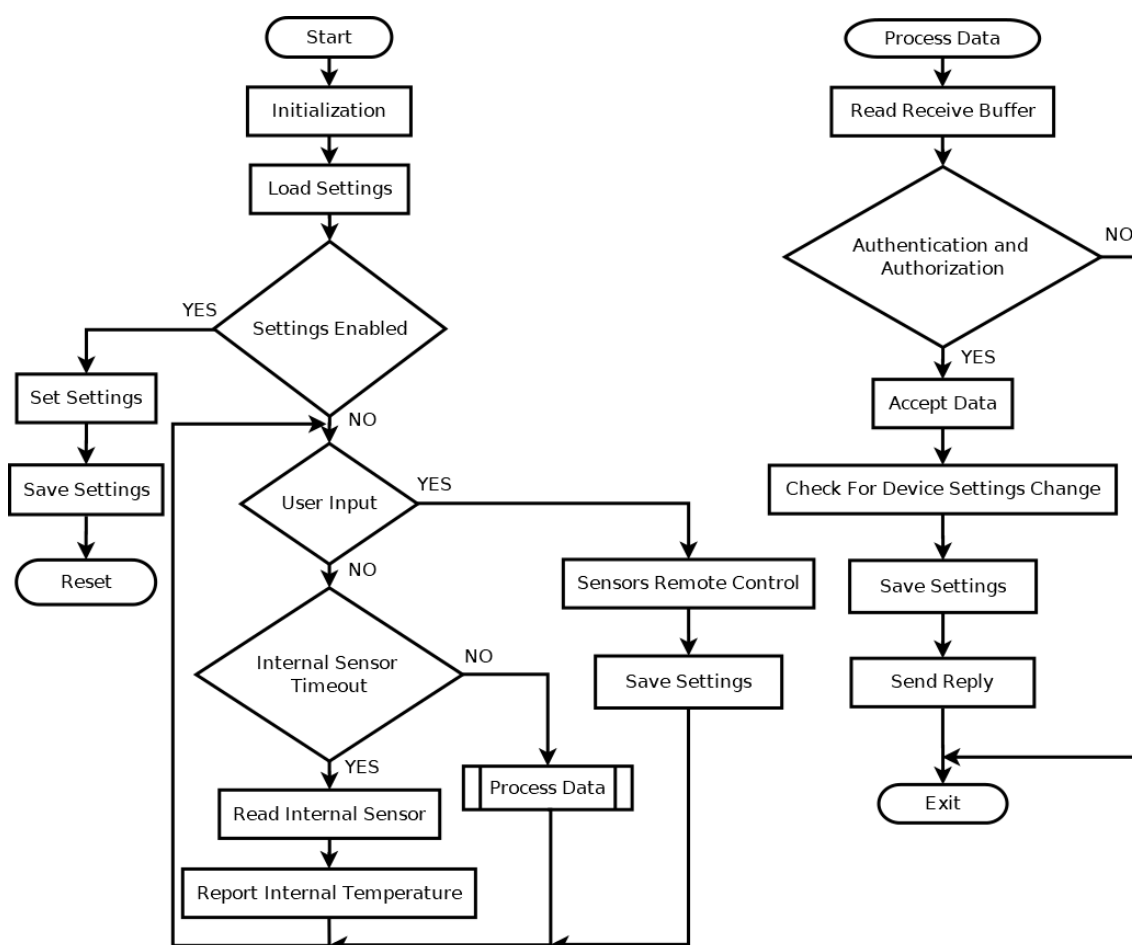
Centrální jednotka provede po zapnutí inicializaci, ve které nadefinuje vstupně/výstupní piny, následně provede načtení nastavení jednotky z EEPROM paměti včetně uložených posledních stavů jednotlivých senzorických jednotek.

Poté je jednotkou provedena kontrola sériové linky za účelem zjištění uživatelských požadavků. V případě, že uživatel vyžaduje akci, jednotka zobrazí uživatelské menu k ovládání jednotlivých senzorických jednotek a vyčkává na uživatelské pokyny. V tomto menu je možné nastavit stavy relé a měnit příznak vzdáleného přepnutí do nastavovacího režimu u určené senzorické jednotky. Případně zobrazit aktuální nastavení relé a manuálního nastavení u specifikované senzorické jednotky. V rámci tohoto menu je také možné zvolit mezi metodou povolení přístupu a zpracování příchozích paketů pomocí White listu (všichni, co nejsou v Black listu jsou povoleni ke komunikaci a zpracování dat) anebo Black listu (pouze ti, co jsou ve White listu jsou povoleni ke komunikaci a zpracování dat).

Pokud není žádný uživatelský požadavek, přejde jednotka na kontrolu příchozích dat z LoRa modulu. Pokud jsou nějaká data přijata, provede jednotka autentizaci a autorizaci podle White/Black listu. Jestliže je paket autentizován a autorizován provede se jeho zpracování a vyhodnocení. Během zpracování paketu se kontroluje stav relé a vzdáleného manuálního sepnutí s očekávanými hodnotami uloženými v centrální jednotce. V případě, že jsou hodnoty odlišné, tak je v odpovědi změněn příznak Message Code a do zprávy jsou uvedeny očekávané hodnoty. V opačném případě se do odpovědi přepíše stavy z přijatého paketu. Následně centrální jednotka odpoví senzorické jednotce se strukturou zprávy viz kap. 3.5.

V případě, že přijatý paket není autentizován anebo autorizován je paket zahozen a jednotka opět kontroluje uživatelský vstup.

Průběh činnosti programu centrální jednotky je možné vidět na vývojovém diagramu viz obr. 4.1.



Obr. 4.1: Vývojový diagram průběhu programu centrální jednotky.

4.4 Krycí krabíčka

V rámci bakalářské práce byla pro navrženou DPS centrální jednotku navržena a vytvořena krabíčka, která poskytuje krytí vnitřních komponentů a umožňuje instalaci pomocí čtyř otvorů s průměry 3 mm na stěnu, trám dle potřeby.

K návrhu krabíčky byl použit program Autodesk Fusion 360 ve studentské licenci. Krabíčka byla následně vytištěna na 3D tiskárně technologií FDM pro účely prototypu byl zvolen materiál PLA, nicméně pro odolnější a trvalejší řešení by bylo vhodnější zvolit materiály ABS nebo PETG, které jsou teplotně odolnější, lépe odolávají působení okolních vlivů a lépe se opracovávají.

Fotografie sestavené krabičky s DPS verze 1.0 je k vidění na obr. 4.2. Další fotografie jsou k dispozici na přiloženém paměťovém mediu.



Obr. 4.2: Sestavená krabička včetně osazené DPS centrální jednotky.

4.5 Struktura datových jednotek

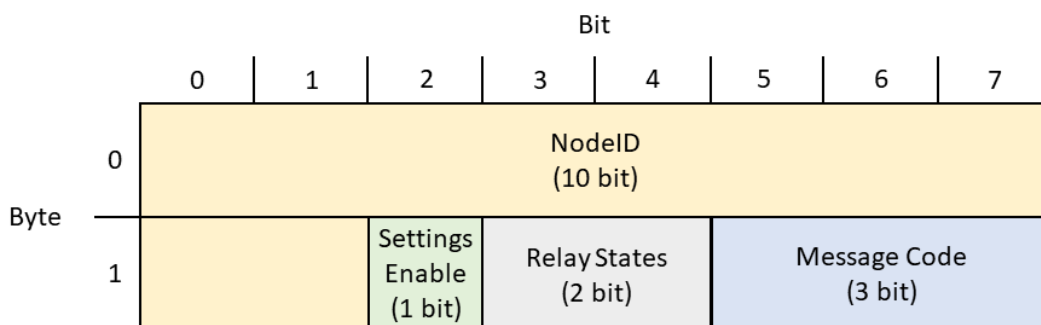
Centrální jednotka po obdržení datového paketu od senzorické jednotky provede zpracování přijatých dat a neprodleně odešle odpověď. Tato odpověď má strukturu viz obr. 4.3.

Součástí odpovědi je deseti bitové NodeID, které má hodnotu shodnou s NodeID datového paketu přijatého od senzorické jednotky. Takto je senzorická jednotka schopna snadno rozlišit, zda je paket určen pro ni. Po NodeID následuje jedno bitový příznak Settings Enable indikující manuální vzdálené přepnutí do nastavovacího režimu, v případě že je příznak roven 1, tak senzorická jednotka uloží tuto změnu do své EEPROM paměti a provede restart po kterém bude vyčkávat v nastavovacím menu pro další pokyny skrze sériovou linku. Poté paket obsahuje

dvou bitové pole Relay States ve kterém jsou přenášeny očekávané stavy obou relé senzorické jednotky. Nakonec doplňuje paket do dvou bajtů, tří bitové pole Message Code, které slouží k indikaci senzorické jednotce, jak proběhlo zpracování datového paketu v centrální jednotce. Jednotlivé hodnoty tohoto pole značí:

- 0 – příjem a zpracování datové jednotky proběhl v pořádku,
- 1 - příjem a zpracování datové jednotky proběhlo v pořádku, byly detekovány změny mezi přijatými a očekávanými hodnotami,
- 2 – příjem datové jednotky proběhl v pořádku, ale nastala chyba při porovnání přijatých a očekávaných hodnot,
- 7 – přístup byl odepřen, datový paket nebyl zpracován.

Z dostupných 8 kombinací Message Code jsou využity pouze 4, proto je možné v budoucnu přidat další oznámení pro senzorickou jednotku.



Obr. 4.3 Struktura paketu odpovědi od centrální jednotky.

5 TESTOVÁNÍ NAVRŽENÉHO ŘEŠENÍ

Pro ověření funkčnosti navrženého řešení byla sestrojena jedna centrální jednotka a dále byla sestavena jedna senzorická jednotka s externím časovačem TPL5110 a jedna s Watchdog časovačem. Na těchto sestavených deskách bylo provedeno několik testů viz následující podkapitoly.

5.1 Testování maximálního dosahu

V rámci bakalářské práce bylo realizováno kontrolní měření maximálního dosahu vytvořeného řešení. Měření proběhlo v místě Pyšel, Budišov a okolí (kraj Vysočina, okres Třebíč). Měření proběhlo za podmínek umístění senzorické jednotky do výšky přibližně dvou metrů nad zemí (měřicí bod 0) a dále se s ní nepohybovalo. Centrální jednotka byla držena v ruce nad hlavou v přibližné výšce dvou metrů a bylo s ní pohybováno. Na každém měřicím bodě bylo zastaveno a provedeno několik výměn zpráv při kterých byly zaznamenány hodnoty *RSSI* a *SNR* z nichž jsou zprůměrované hodnoty uvedeny v tab. 5.1.

Jak centrální jednotka, tak senzorická jednotka byly vybaveny 3 dBi anténami a nastavení jejich rádií bylo následující:

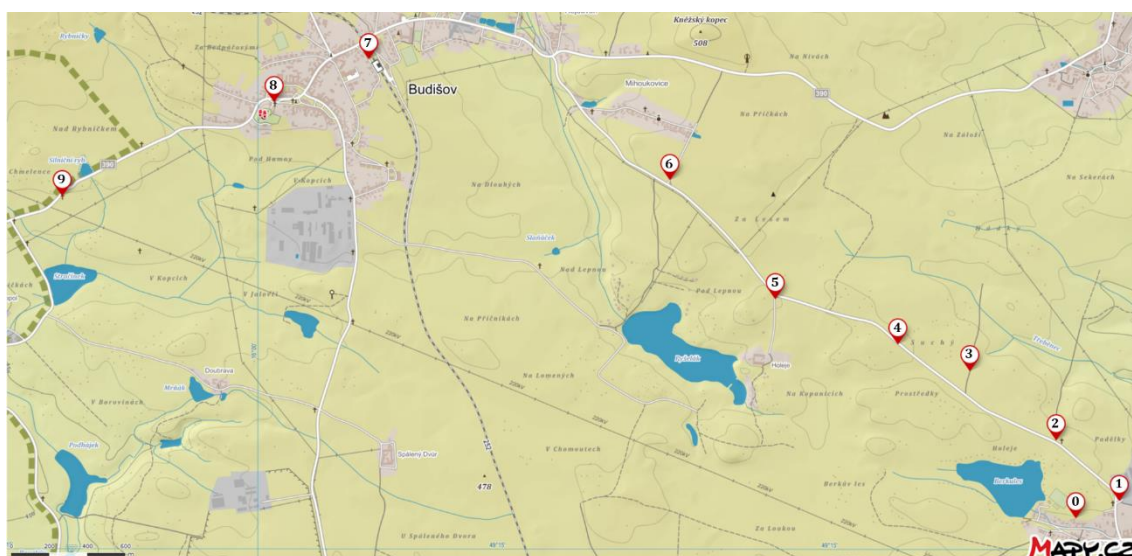
- $f = 868,0$ MHz,
- $TxPower = 20$ dBm,
- $ModemConfig = 0$ (BW = 125 kHz, CR = 4/5, SF = 128 chips/symbol, CRC on) pro SF = 7,
- $ModemConfig = 3$ (BW = 125 kHz, CR = 4/8, SF = 4096 chips/symbol, CRC on) pro SF = 12.
- $SleepInterval = 2$ (~16 sekund).

Při měření se SF = 7 bylo na nejvzdálenějších místech zaznamenáno *RSSI* dosahující hodnot až -133 dBm a *SNR* až -9 dB. V případě SF = 12 byly tyto hodnoty ještě nižší, a to *RSSI* až -146 dBm a *SNR* až -21 dB.

Měření ukázalo, že SF = 7 je vhodný pro použití na kratší vzdálenosti do 2 km a do míst s menším rušením. Zatímco SF = 12 je schopný pracovat na vzdálenost více jak 5 km a hodí se tedy pro síť senzorů vzdálených velice daleko od centrální jednotky a pro případy se silně zarušeným prostředím.

Tab. 5.1: Naměřené dosažené vzdálenosti v několika měřicích bodech a jejich *RSSI*, *SNR*.

Měřicí bod	Nadmořská výška [m]	Vzdušná vzdálenost od bodu 0 [m]	<i>SF</i> = 7		<i>SF</i> = 12	
			<i>RSSI</i> [dBm]	<i>SNR</i> [dB]	<i>RSSI</i> [dBm]	<i>SNR</i> [dB]
0	470	-	-	-	-	-
1	469	241	-100	9	-101	9
2	473	420	-107	8	-111	7
3	475	944	-116	4	-115	4
4	482	1301	-119	0	-119	2
5	480	1953	-129	-5	-131	-7
6	482	2765	-	-	-143	-18
7	484	4416	-	-	-142	-18
8	489	4727	-	-	-146	-21
9	468	5568	-	-	-144	-19



Obr. 5.1: Mapa s vyznačenými měřicími místy.

5.2 Dokumentace energetické náročnosti

Během bakalářské práce bylo provedeno měření spotřeby energie pro různé kombinace napájecího napětí, připojených senzorů a nastavení RFM95 modulu. Z naměřených výsledků byly stanoveny průměrné spotřeby senzorické jednotky pro různé kombinace.

Z průběhu odběru proudu při napájecím napětí 3,3 V bez externího čidla u verze 2.0 byl vynesena graf viz Obr. 5.2 z kterého byly zjištěny podrobnější informace, které byly dále použity pro odhad výdrže na baterii.

Pro měření průběhu odběru proudu byl použit power analyzátor Keysight N605B, který byl vybaven moduly N6742B. Ke zpracování změřených dat byl využit program Matlab, kterým byly také vykresleny průběhy odběru proudu. Nastavení senzorické jednotky v průběhu testů bylo:

- $f = 868,0$ MHz,
- $TxPower = 20$ dBm,
- $ModemConfig = 0$ ($BW = 125$ kHz, $CR = 4/5$, $SF = 128$ chips/symbol, CRC on) pro $SF = 7$,
- $ModemConfig = 3$ ($BW = 125$ kHz, $CR = 4/8$, $SF = 4096$ chips/symbol, CRC on) pro $SF = 12$,
- $SleepInterval = 45$ (~6 minut).

Každý test probíhal 13 minut během kterého proběhly tři měřicí cykly s výměnou zpráv a dva průběhy spánku. Z naměřených výsledků byly vybrány vždy dva měřicí cykly a dva průběhy spánku odpovídající dvěma celým cyklům senzorické jednotky. Interval vzorkování odběru proudu byl s ohledem na délku testu zvolen 204,8 μ s. V průběhu testu byla aktivní pouze jedna senzorická jednotka, tak aby byly zajištěny optimální podmínky dostupnosti centrální jednotky. Nastavení rádia u centrální jednotky bylo shodné s nastavením senzorické jednotky.

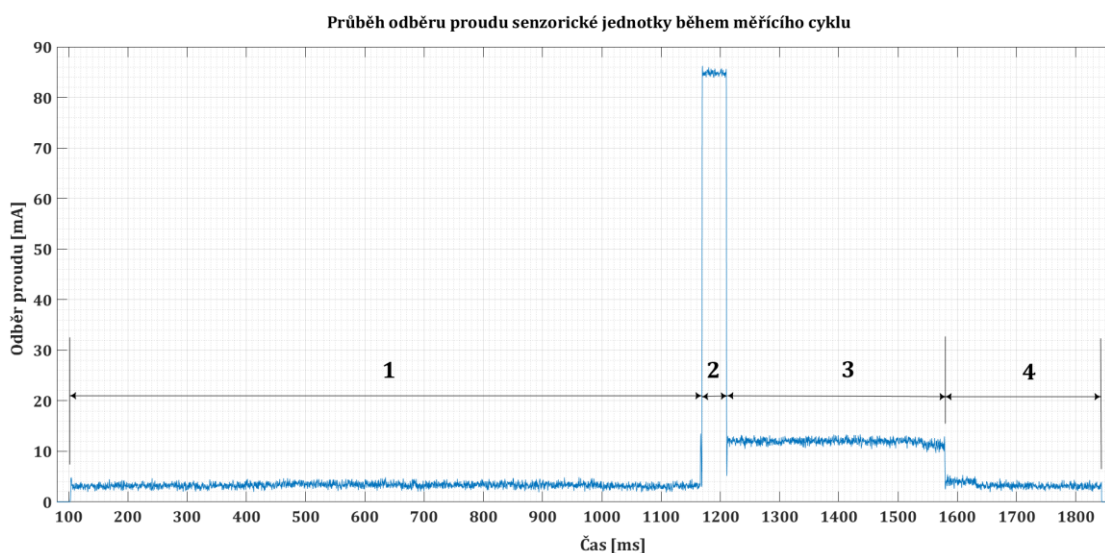
5.2.1 Průběh odběru proudu během jednoho měřícího cyklu

Průběh odběru proudu lze rozdělit do čtyř pomyslných částí během kterých jsou vykonávány určité části programu. Samotný průběh odběru proudu je vykreslen na obr. 5.2.

Část první se skládá z inicializace senzorické jednotky, kontroly stavu baterie, načtení nastavení z EEPROM, naměření dat a jejich přípravy k odeslání. Během této doby se průměrný odběr proudu pohyboval kolem 3,3 mA a její délka byla v případě bez externího čidla 1065,8 ms. V případě připojeného externího čidla by se tato hodnota prodloužila o čas nutný k změření, předání dat od externího čidla a jejich formátování do paketu. Pro případ s BMP280 by měření a předání dat přidalo přibližně 51 ms, pro BH1750FVI přibližně 131 ms. Pro případ externího čidla DS18B20 by doba zůstala téměř stejná jako pro případ bez externího čidla, protože obě čidla dostávají pokyn k měření ve stejném okamžiku a tím se neprodlužuje měřicí čas, pouze je přidána prodleva vlivem čtení hodnot ze dvou

čidel. Dále by vlivem formátování dat od externího čidla do paketu byla přidána prodleva v řádu několika ms.

Druhá část je složena ze samotného probuzení LoRa modulu a vyslání datového paketu k centrální jednotce. Vyslání paketu předchází interval, kdy je sledováno, zda je sdílené rádiové medium volné k vyslání. Tento interval se nazývá CAD (Channel Activity Detection) a může trvat až 1000 ms. Jeho průměrný odběr proudu je roven přijímacímu proudu, 12 mA. Během CAD senzorická jednotka kontroluje, jestli již nevysílá někdo jiný, aby se zabránilo současnému vyslání více účastníků a jejich vzájemnému rušení. Po této kontrole je vyslán datový paket viz kap. 3.5. Vyslání může trvat až 42 ms pro $SF = 7$, resp. 1344 ms pro $SF = 12$, a jeho odběr je pro vysílací výkon 20 dBm průměrně 84,3 mA.



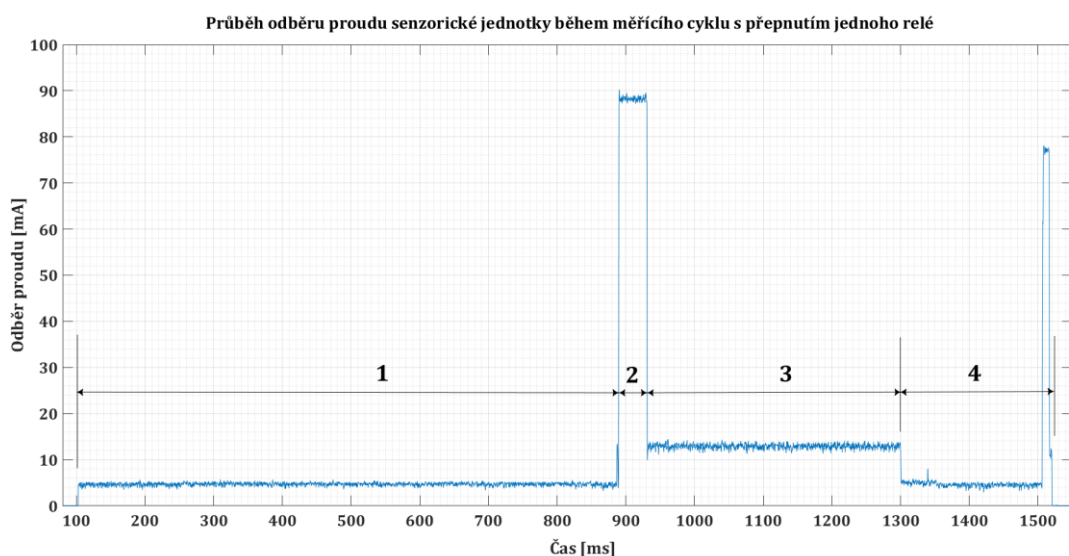
Obr. 5.2: Průběh odběru proudu senzorické jednotky během měřicího cyklu.

Třetí část se skládá z čekání na odpověď, během kterého rádiový modul neustále čeká na přijetí paketu. Tato část může trvat až 2000 ms a její odběr je roven odběru v režimu příjmu, 12 mA. Po detekci vyslání začíná přijímání paketu, které pro $SF = 7$ může trvat až 36 ms, resp. pro $SF = 12$ až 1152 ms. Po přijetí paketu nebo uběhnutí intervalu přejde rádiový modul do klidové režimu, aby se šetřilo s baterií.

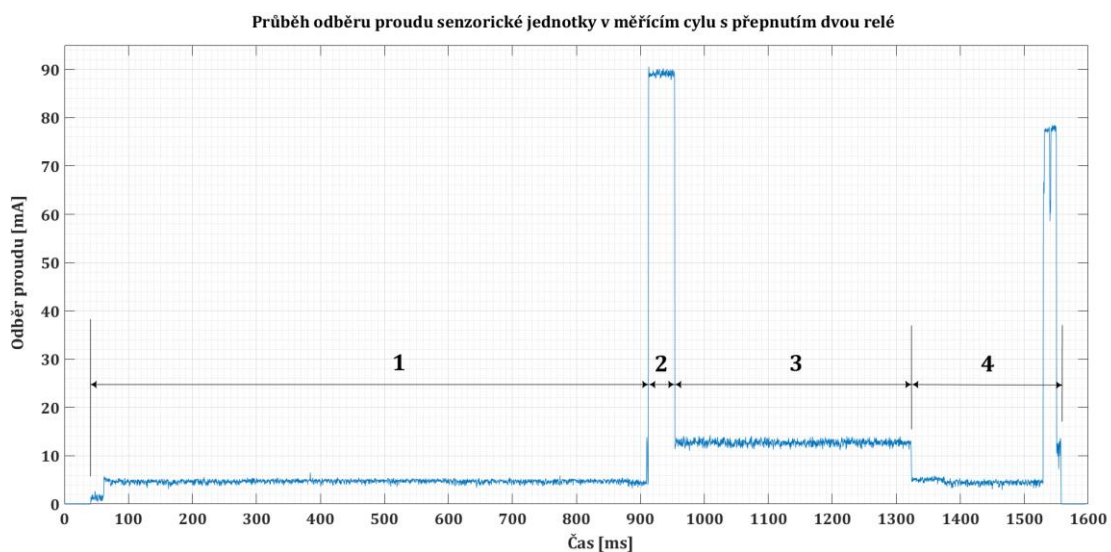
Poslední část průběhu se skládá ze zpracování přijaté odpovědi (struktura odpovědi viz kap. 0) a případné změny nastavení v závislosti na přijatých pokynech v odpovědi. MCU nejprve zpracuje přijatá data a poté provádí kontrolu stavů relé s přijatými pokyny. Následně kontroluje příznak pro manuální nastavení jednotky. Nakonec se provede porovnání běžících nastavení s uloženými v EEPROM a pokud se neshodují, tak se běžící nastavení zapíše do EEPROM. Během této části má jednotka průměrný odběr 3,3 mA.

5.2.2 Průběh odběru proudu během jednoho měřícího cyklu při změně stavů relé

Průběh odběru proudu při změně stavu relé je téměř totožný s průběhem bez přepnutí relé. Jediný zásadní rozdíl je v prodloužení části 4, která se prodlouží o změnu stavu relé a bude mít vyšší průměrný odběr. Při přepnutí jednoho relé se průměrný odběr proudu zvýší na 8,1 mA a délka části se prodlouží o přibližně 10 ms. Při přepnutí obou relé se průměrný odběr zvýší až na 11,1 mA a doba části 4 vzroste o přibližně 20 ms. Průběhu odběru proudu při změně stavu jednoho relé viz. obr. 5.3 a při změně obou relé viz. obr. 5.4.



Obr. 5.3: Průběh odběru proudu senzorické jednotky během změny stavu jednoho relé.



Obr. 5.4: Průběh odběru proudu senzorické jednotky během změny stavu dvou relé.

5.2.3 Odhad výdrže na baterii

Z výsledků měření spotřeby byla stanovena průměrná spotřeba senzorické jednotky pro interval spánku 6 minut a za předpokladu nepřipojení externího čidla. Pro senzorickou jednotku ve verzi 1.0 byla průměrná spotřeba energie pro nastavený $SF = 7$ stanovena na $39,64 \mu A$, pro $SF = 12$ byla hodnota mnohem vyšší a to $370,7 \mu A$. U verze 2.0 byla průměrná spotřeba nižší díky tomu, že ve spánku byl aktivní pouze externí časovač TPL5110, namísto aktivního regulátoru a MCU v případě verze 1.0. Spotřeba verze 2.0 činila $32,81 \mu A$ pro $SF = 7$ a $364 \mu A$ pro případ se $SF = 12$.

Pro odhad výdrže senzorické jednotky na baterii bylo vycházeno z předpokladu podle vzorce 5.1. Tedy že senzorická jednotka odebírá z baterie průměrně určitou energii (průměrná spotřeba). Pokud tento odběr vztáhneme k jedné hodině, tak můžeme vyjádřit odhadovanou výdrž na jednu nabitou baterii.

$$\text{Doba výdrže baterie [h]} = \frac{\text{Kapacita baterie [Ah]}}{\text{Průměrná proudová spotřeba [A]}} \quad (5.1)$$

Odhady výdrže byly provedeny pro případ použití baterie Li-Ion Panasonic NCR18650B-MH12210 [41] velikosti 18650 s nominálním napětím článku 3,6 V a typickou kapacitou 3350 mAh, z které bylo předpokládáno reálné využití 90 % kapacity (3015 mAh). Dále byl předpoklad použití baterie při pokojové teplotě bez velkého kolísání teploty a nebylo uvažováno použití baterie s ochranným obvodem, který dále omezuje rozsah použitelnosti baterie a zavádí další parazitní vybíjecí obvod. Pro obecnou Li-Ion baterii je deklarována průměrná hodnota samovybíjení mezi 1 a 2 % kapacity za měsíc podle [42]. Pro účely odhadu byla zvolena nižší hodnota 1 %, která odpovídá vybíjecímu proudu přibližně $46,53 \mu A$.

Odhad byl vypočten pro případ uvažování samovybíjení i pro případ bez samovybíjení, který je ale pouze idealizací a je uveden pro názornost. Příklad výpočtu výdrže na baterii viz níže.

$$\begin{aligned} \text{Doba výdrže baterie [h]} &= \frac{\text{Kapacita baterie [Ah]}}{\text{Průměrná proudová spotřeba [A]}} = \\ &= \frac{3,015}{39,64 \cdot 10^{-6} + 46,53 \cdot 10^{-6}} = 34989 \text{ h} \cong 3 \text{ roky } 11 \text{ měsíců } 27 \text{ dní} \end{aligned}$$

Tab. 5.2: Odhad výdrže senzorické jednotky zaokrouhlený na celé dny ve formátu [Y – roky, M – měsíce, D – dny].

	Časovač	$SF = 7$	$SF = 12$
bez samovybíjení baterie	Watchdog	8Y 8M 4D	0Y 11M 4D
	TPL5110	10Y 5M 24D	0Y 11M 10D
se samovybíjením baterie	Watchdog	3Y 11M 27D	0Y 9M 27D
	TPL5110	4Y - 4M 1D	0Y 10M 2D

Pro odhad doby výdrže byla uvažována délka jednoho roku 365,25 dní a délka jednoho měsíce byla zprůměrována na 30,4375 dne.

Z výsledků odhadu je patrné, že samovybíjení baterie způsobuje značný rozdíl mezi teoretickou a reálně dosažitelnou výdrží, proto by bylo vhodné baterii udržovat v takovém stavu, kdy je samovybíjení nejnižší. Tomuto stavu se lze přiblížit udržováním baterie v teplotním rozsahu doporučeným výrobcem, nezatěžovat baterii více než je dovolené.

Výsledky také ukazují značnou závislost na použitém SF , kdy s jeho vyšší hodnotou roste maximální dosah a odolnost vůči rušení, ale na úkor výdrže baterie. Proto je vhodné pro konkrétní aplikaci volit takové nastavení SF , aby systém pracoval korektně s určitou odolností vůči rušení a zároveň poskytoval maximální výdrž baterie.

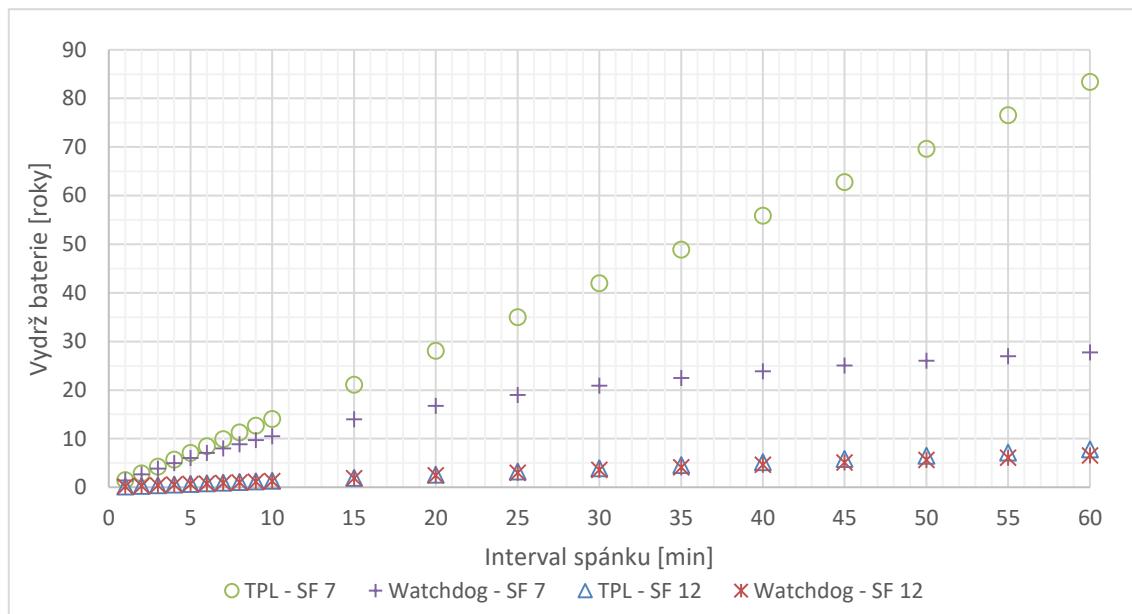
5.2.4 Odhad výdrže na baterii při volbě jiného intervalu spánku

Předchozí odhady byly provedeny pro interval spánku šest minut. Tento interval lze měnit v závislosti na požadavku odezvy senzorických jednotek na příkazy, četnosti měření atd. Pro senzorickou jednotku verze 1.0 je možné interval měnit softwarově od 8 sekund po teoreticky více než 6 dní. Naopak u verze 2.0 je díky externímu časovači možné volit pouze z předem předdefinovaných intervalů pomocí DIP přepínače anebo předpřipraveným potenciometrem nastavit vlastní interval od přibližně 100 ms po více jak jednu hodinu.

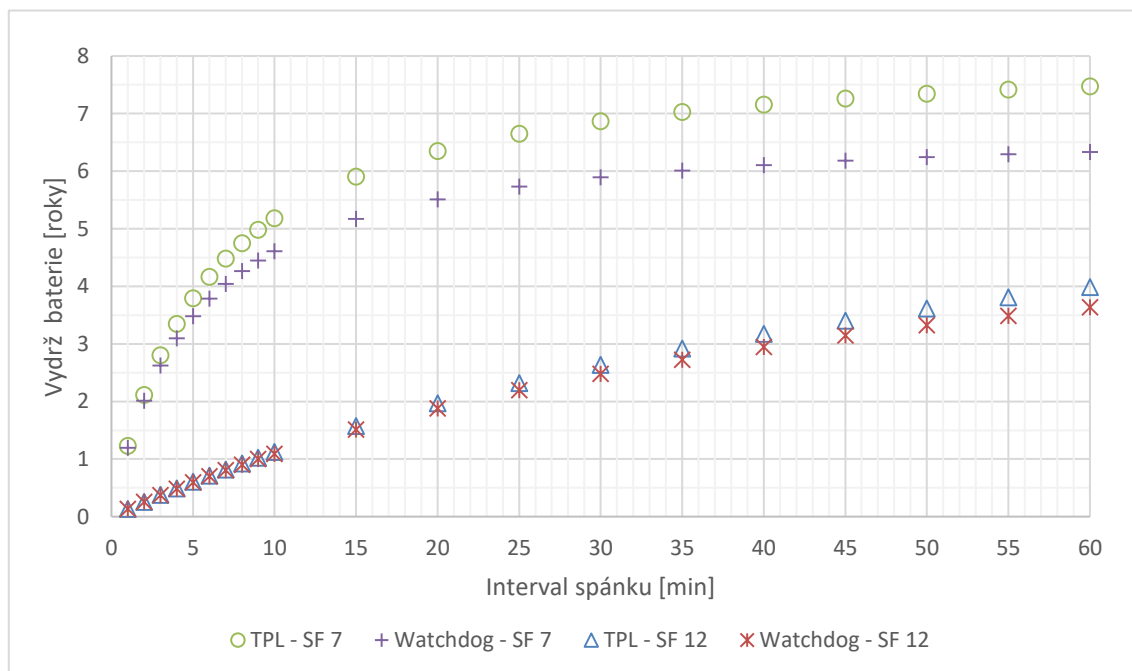
Stejně jako v přechodích odhadech byly provedeny odhady výdrže při uvažování samovybíjení baterie a bez něho. Výsledky byly zpracovány do přehledných grafů viz obr. 5.5 a obr. 5.6.

Z průběhů grafů obr. 5.5 je viditelné, že s rostoucím intervalem spánku klesá průměrná spotřeba a tím se zvyšuje výdrž jednotky na baterii s přibližně lineárním průběhem. Pokud ale zahrneme do odhadu samovybíjení baterie, tak nárůst výdrže není lineární s časem, ale spíše logaritmický. Tato změna průběhu je způsobena závislostí samovybíjecího proudu baterie a samotné spotřeby senzorické jednotky, tak že s rostoucím intervalem spánku odběr senzorické jednotky přestává tvořit

většinový odběr z baterie a začíná převažovat samotné samovybíjení. Proto se nevyplatí prodlužovat interval spánku nad určitou mez, neboť poté již nepřinese patrné zlepšení výdrže na baterii.



Obr. 5.5: Odhad výdrže senzorické jednotky při neuvažování samovybíjení baterie pro různé intervaly spánku.



Obr. 5.6: Odhad výdrže senzorické jednotky při uvažování samovybíjení baterie pro různé intervaly spánku.

ZÁVĚR

V první polovině bakalářské práce je provedeno shrnutí současné problematiky Internetů věcí (IoT). Součástí shrnutí je porovnání dostupných bezdrátových technologií (Wi-Fi, Bluetooth, RFID atd.) a také je představeno několik dnes dostupných IoT technologií (ZigBee, Z-Wave atd.). Dále jsou představeny LPWAN (Low Power Wide Area Network) technologie do kterých spadá Sigfox a LoRa.

Sigfox je jako řešení na trhu dostupné nejdéle, a proto je více rozšířené a odladěné. Naopak nově přicházející technologie LoRa je velice slibný konkurent, protože přináší prvky, které Sigfox nemá nebo nabízí v omezené míře např. počet přenosů za den.

V druhé polovině bakalářské práce je proveden návrh senzorické a centrální jednotky. Při návrhu komponent a zapojení je vycházeno z volně dostupných zapojení vývojové desky Arduino Pro Mini. Při výběru komponent pro senzorickou jednotku je kladen důraz na minimalizaci spotřeby za účelem prodloužit výdrž na baterii. Proto jsou zvoleny komponenty s velmi malými klidovými proudy a dostupnými režimy spánku. Na základě vybraných komponentů jsou sestrojeny prototypy, na kterých je řešení otestováno a optimalizováno. Poté jsou navrženy desky plošných spojů, které jsou vyrobeny profesionální firmou technologií dvouvrstvé desky se servisním potiskem a nepájivou maskou, obrázky DPS viz příložené paměťové medium.

Dále jsou popsány postupy při vytváření firmwaru pro senzorickou i centrální jednotku. Jsou popsány struktury jednotlivých datových paketů pro případy použití různých externích čidel, vlastnosti jejich jednotlivých hodnot. Také jsou popsány průběhy činnosti firmwaru pro senzorickou jednotku (obr. 3.2) a pro centrální jednotku (obr. 4.1).

Během bakalářské práce jsou provedeny testy navrženého řešení, které se skládají z testování dosahu. Při testování jsou použity 3 dBi antény a vysílací výkon je nastaven na 20 dBm. Při volbě $SF = 7$ je dosaženo dosahu až 2 km, zatímco při $SF = 12$ je možné spolehlivě komunikovat na vzdálenost více jak 5,5 km. Změřené hodnoty $RSSI$ a SNR naznačují, že navržené řešení by bylo schopné dosáhnout ještě většího dosahu za optimálních podmínek.

Další testy jsou cíleny na zjištění průměrné spotřeby senzorické jednotky a odhad její výdrže na baterii. Z výsledků je patrné, že při volbě baterie s kapacitou 3350 mAh je senzorická jednotka schopna pracovat na baterii až více jak 7 let při uvažování samovybíjení baterie a za ideálních podmínek, podrobně viz kap. 5.2.

V neposlední řadě je pro senzorickou jednotku, u které je předpoklad použití ve venkovním prostředí vybrána a sestrojena krycí krabička s dostatečným krytím, která by měla být schopna odolávat větru, kapající vodě a vniku většího množství

prachu. Pro centrální jednotku je na míru navržena a vytištěna krabička pomocí technologie 3D tisku, odpovídající požadavkům.

Literatura

- [1] BARTON, R.; GROSSETETE, P.; HANES, D.; HENRY, J.; SALGUIERO, G. IoT Fundamentals: Networking Technologies, Protocols, and Use Cases for the Internet of Things. 3rd edition. Indianapolis, In: Cisco Press, 2017. ISBN 978-1587144561
- [2] SMILEY, S. Active RFID vs. Passive RFID: What's the Difference?. In: RFID Insider [Online]. 2016-4-3 [cit. 2017-11-12]. Dostupné z: <https://blog.atlasrfidstore.com/active-rfid-vs-passive-rfid>
- [3] IEEE802.11ac: The Next Evolution of Wi-Fi™ Standards. In: Qualcomm [Online]. 2013-7-18 [cit. 2017-10-28]. Dostupné z: <https://www.qualcomm.com/documents/qualcomm-research-ieee80211ac-next-evolution-wi-fi>
- [4] POOLE, Ian. IEEE 802.11 Wi-Fi Standards. In: Radio-Electronics. [Online]. [cit. 2017-10-28]. Dostupné z: <http://www.radio-electronics.com/info/wireless/wi-fi/ieee-802-11-standards-tutorial.php>
- [5] Discover Wi-Fi: Security. In: Wi-Fi Alliance. [Online]. [cit. 2017-10-28]. Dostupné z: <https://www.wi-fi.org/discover-wi-fi/security>.
- [6] POOLE, Ian. Bluetooth Technology Tutorial. In: Radio-Electronics. [Online]. [cit. 2017-10-28]. Dostupné z: http://www.radio-electronics.com/info/wireless/bluetooth/bluetooth_overview.php
- [7] TORVMAEK, Karl. Three flavours of Bluetooth: Which one to choose?. In: TI. [Online]. 2014 [cit. 2017-10-28]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/wp/swry007/swry007.pdf>
- [8] AL-FUQAHA, Ala, Mohsen GUIZANI, Mehdi MOHAMMADI, Mohammed ALEDHARI a Moussa AYYASH. Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications. IEEE Communications Surveys & Tutorials [Online]. 2015, 17(4), 2347-2376 [cit. 2017-10-28]. DOI: 10.1109/COMST.2015.2444095. ISSN 1553-877x. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7123563/>
- [9] MARINCIC, Antonija, Antun KERNER a Dina SIMUNIC. Interoperability of IoT wireless technologies in ambient assisted living environments. In: 2016 Wireless Telecommunications Symposium (WTS) [Online]. IEEE, 2016, s. 1-6 [cit. 2017-10-29]. DOI: 10.1109/WTS.2016.7482046. ISBN 978-1-5090-0314-3. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7482046/>
- [10] ZigBee for Developers: Network Specifications. In: ZigBee Alliance. [Online]. [cit. 2017-10-29]. Dostupné z: <http://www.zigbee.org/zigbee-for-developers/network-specifications>
- [11] HWANG, Yitaek. Cellular IoT Explained – NB-IoT vs. LTE-M vs. 5G and More. In: Leverage Blog. [Online]. [cit. 2017-11-2]. Dostupné z: <https://www.leverage.com/blogpost/cellular-iot-explained-nb-iot-vs-lte-m>

- [12] LTE IoT Evolution. In: Qualcomm. [Online]. [cit. 2017-11-2]. Dostupné z: <https://www.qualcomm.com/invention/technologies/lte/advanced-pro/lte-iot>
- [13] LIBERG, Olof. Cellular Internet of Things. In: 3GPP. [Online]. 2017-10-24 [cit. 2017-11-2]. Dostupné z: <http://www.3gpp.org/ciot>
- [14] Cellular Networks For Massive IoT. In: Ericsson. [Online]. 2016 [cit. 2017-11-2]. Dostupné z: https://www.ericsson.com/assets/local/publications/white-papers/wp_iot.pdf
- [15] Z-Wave: FAW, resources. In: Z-Wave. [Online]. [cit. 2017-10-31]. Dostupné z: <http://www.z-wave.com/faq>
- [16] About Z-Wave Technology. In: Z-Wave Alliance. [Online]. [cit. 2017-10-31]. Dostupné z: <https://z-wavealliance.org/about-z-wave-technology/>
- [17] MARGELIS, George, Robert PIECHOCKI, Dritan KALESHI a Paul THOMAS. Low Throughput Networks for the IoT: Lessons learned from industrial implementations. In: 2015 IEEE 2nd World Forum on Internet of Things (WF-IoT) [Online]. IEEE, 2015, s. 181-186 [cit. 2017-11-6]. DOI: 10.1109/WF-IoT.2015.7389049. ISBN 978-1-5090-0366-2. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7389049/>
- [18] Sigfox: Technical Overview. In: Sigfox. [Online]. 2017 [cit. 2017-11-6]. Dostupné z: <https://www.disk91.com/wp-content/uploads/2017/05/4967675830228422064.pdf>
- [19] MORIN, Elodie, Mickael MAMAN, Roberto GUIZZETTI a Andrzej DUDA. Comparison of the Device Lifetime in Wireless Networks for the Internet of Things. IEEE Access [Online]. 2017, 5, 7097-7114 [cit. 2017-11-6]. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2688279. ISSN 2169-3536. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7894201/>
- [20] LoRa™ Modulation Basics, AN1200.22. In: Semtech. [Online]. 2015-5-2 [cit. 2017-10-28]. Dostupné z: <http://www.semtech.com/images/datasheet/an1200.22.pdf>
- [21] AUGUSTIN, Aloÿs, Jiazi YI, Thomas CLAUSEN a William TOWNSLEY. A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things. Sensors [Online]. 2016, 16(12), 1466- [cit. 2017-11-9]. DOI: 10.3390/s16091466. ISSN 1424-8220. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1424-8220/16/9/1466>
- [22] What is LoRa?. In: LinkLabs Blog. [Online]. [cit. 2017-11-8]. Dostupné z: <https://www.link-labs.com/blog/what-is-lora>
- [23] LoRaWAN™: What is it?. In: LoRa Alliance. [Online]. 2015 [cit. 2017-11-9]. Dostupné z: https://docs.wixstatic.com/ugd/eccc1a_ed71ea1cd969417493c74e4a13c55685.pdf

- [24] CENTENARO, Marco, Lorenzo VANGELISTA, Andrea ZANELLA a Michele ZORZI. Long-range communications in unlicensed bands: the rising stars in the IoT and smart city scenarios. IEEE Wireless Communications [Online]. 2016, 23(5), 60-67 [cit. 2017-11-9]. DOI: 10.1109/MWC.2016.7721743. ISSN 1536-1284. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7721743/>
- [25] LoRaWAN™: Security. In: LoRa Alliance. [Online]. 2017 [cit. 2017-11-12]. Dostupné z: https://docs.wixstatic.com/ugd/eccc1a_cc44304714c14f80a6ce50fc9fcee2a.pdf
- [26] ATmega328/P: Datasheet Complete. In: Atmel. [Online]. 2016 [cit. 2017-10-21]. Dostupné z: http://www.atmel.com/Images/Atmel-42735-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega328-328P_Datasheet.pdf
- [27] RN2483. In: Microchip. [Online]. [cit. 2017-11-17]. Dostupné z: <http://www.microchip.com/wwwproducts/en/RN2483>
- [28] RFM95/96/97/98(W) – Low Power Long Range Transceiver Module V1.0. In: HopeRF. [Online]. [cit. 2017-10-21]. Dostupné z: http://www.hoperf.com/upload/rf/RFM95_96_97_98W.pdf
- [29] DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer. In: Maximintegrated. [Online]. [cit. 2017-10-21]. Dostupné z: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>
- [30] BMP280: Digital Pressure Sensor. In: Bosch. [Online]. [cit. 2018-5-25]. Dostupné z: <https://ae-bst.resource.bosch.com/media/tech/media/datasheets/BST-BMP280-DS001-19.pdf>
- [31] BV1750FVI: Ambient Light Sensor IC Series. In: Mouser. [Online]. [cit. 2018-5-25]. Dostupné z: <http://www.mouser.com/ds/2/348/bh1750fvi-e-186247.pdf>
- [32] AZ850 Microminiature Polarized Relay. In: Conrad. [Online]. 2011-11-28 [cit. 2017-11-17]. Dostupné z: <http://www.produktinfo.conrad.com/datenblaetter/500000-524999/507442-da-01-en-RELAIS ZETTLER AZ850P2 3.pdf>
- [33] MCP1700: Datasheet. In: Microchip. [Online]. 2016-9-15 [cit. 2017-10-21]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/20001826D.pdf>
- [34] TPL5110 Nano-power System Timer for Power Gating. In: Ti. [Online]. [cit. 2018-25-5]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tpl5110.pdf>
- [35] Arduino official site. In: Arduino. [Online]. [cit. 2017-10-21]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/>
- [36] JLCPCB: Prototype PCBs. In: JLCPCB. [Online]. [cit. 2018-5-22]. Dostupné z: <https://jlcpcb.com/>

- [37] Pawbol: Elektroinstalační krabice a příslušenství. In: Pawbol. [Online]. [cit. 2018-5-25]. Dostupné z: <http://www.pawbol.cz/katalog/a.pdf>
- [38] AMP SUPERSEAL 1.5 Series Connectors. In: Te. [Online]. [cit. 2018-5-24]. Dostupné z: <http://www.pawbol.cz/katalog/a.pdf>
- [39] SH1106: 132x64 Dot Matrix OLED/PLED Segmeng/Common Driver with Controller. In: Elecrow [Online]. [cit. 2017-12-5]. Dostupné z: <https://www.elecrow.com/download/SH1106%20datasheet.pdf>
- [40] LM1117 800-mA Low-Dropout Linear Regulator. In: TI. [Online]. 2016 [cit. 2017-11-17]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm1117.pdf>
- [41] Panasonic NCR18650B: Datasheet. In: GME. [Online]. [cit. 2017-12-2]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.540-547.1.pdf>
- [42] BU-802b: What does Elevated Self-discharge Do?. In: Battery University. [Online]. 2017 [cit. 2017-12-2]. Dostupné z: http://batteryuniversity.com/learn/article/elevating_self_discharge

Seznam symbolů, veličin a zkratek

ACL	Access Control List – Seznam pro řízení přístupu
AES	Advanced Encryption Standard – Standard pokročilého šifrování
Bps	Bits per second – bity za sekundu
CRC	Cyclic Redundancy Check – Cyklický redundantní součet
CSMA-CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
CSS	Chirp Spread Spectrum – Chirpová modulace rozprostřeného spektra
DPS	Deska plošných spojů
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum – Technika přímého rozprostřeného spektra
EDR	Enhanced Data Rate – Vylepšený datový tok
EEPROM	Electrical Erasable Programmable Read-Only Memory – Elektricky vymazatelná paměť pouze pro čtení
FEC	Forward Error Correction – Dopředný korekční kód
GPIO	General Purpose Input Output – Univerzální vstupně/výstupní pin
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile Communications – Systém pro mobilní komunikaci
I ² C	Inter-Integrated Circuit – Počítačová sériová sběrnice
IoT	Internet of Things – Internet věcí
IP	Internet Protocol – Internetový protokol
IPv6	Internet Protocol version 6 – Internetový protokol verze 6
ISM	Industrial, Scientific and Medical – Pásmo pro rádiové vysílání v oborech průmyslu, vědy a zdravotnictví
ISP	In-System Programmer
Kbps	Kilobits per second – kilobity za sekundu
Li-Ion	Lithium-iontový
LPWAN	Low Power Wide Area Network -
LTE	Long Term Evolution
M2H	Machine to Human
M2M	Machine to Machine
MAC	Medium Access Control
Mbps	Megabits per second – Megabity za sekundu
MCU	Microcontroller Unit – Mikrokontrolér
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
MTC	Machine Type Communication
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing – Ortogonální frekvenční multiplex

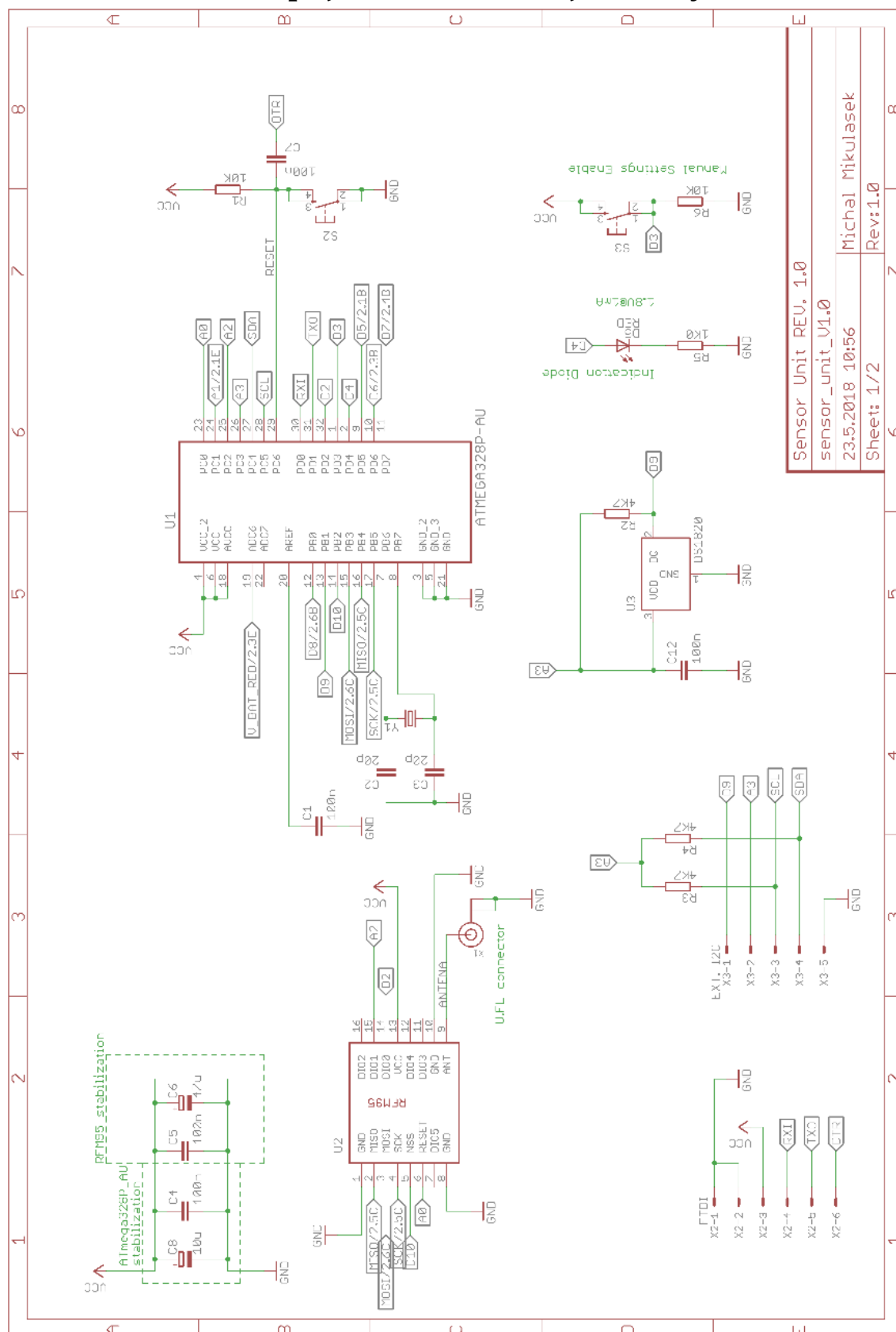
PAN	Personal Area Network
PHY	Physical layer – Fyzická vrstva
QAM	Quadrature Amplitude Modulation – Kvadrurní amplitudová modulace
QoS	Quality of Service – Kvalita služeb
QPSK	Quadrature Phase-Shift Keying – Kvadrurní fázové klíčování
R-FDMA	Random-Frequency Divison Multiple Access
RFID	Radio Frequency Identification – Rádiová Identifikace
SPI	Seriál Peripheral Interface – Sériové periférní rozhraní
SRAM	Static Random Access Memory
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter – Asynchronní sériové rozhraní
UNB	Ultra Narrow Band
VoLTE	Voice Over LTE – Hlas přes LTE
WEP	Wired Equivalent Privacy
Wi-Fi	Wireless Fidelity
WPA	Wi-Fi Protected Access
WPA2	Wi-Fi Protected Access version 2
6LoWPAN	IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks

PŘÍLOHY

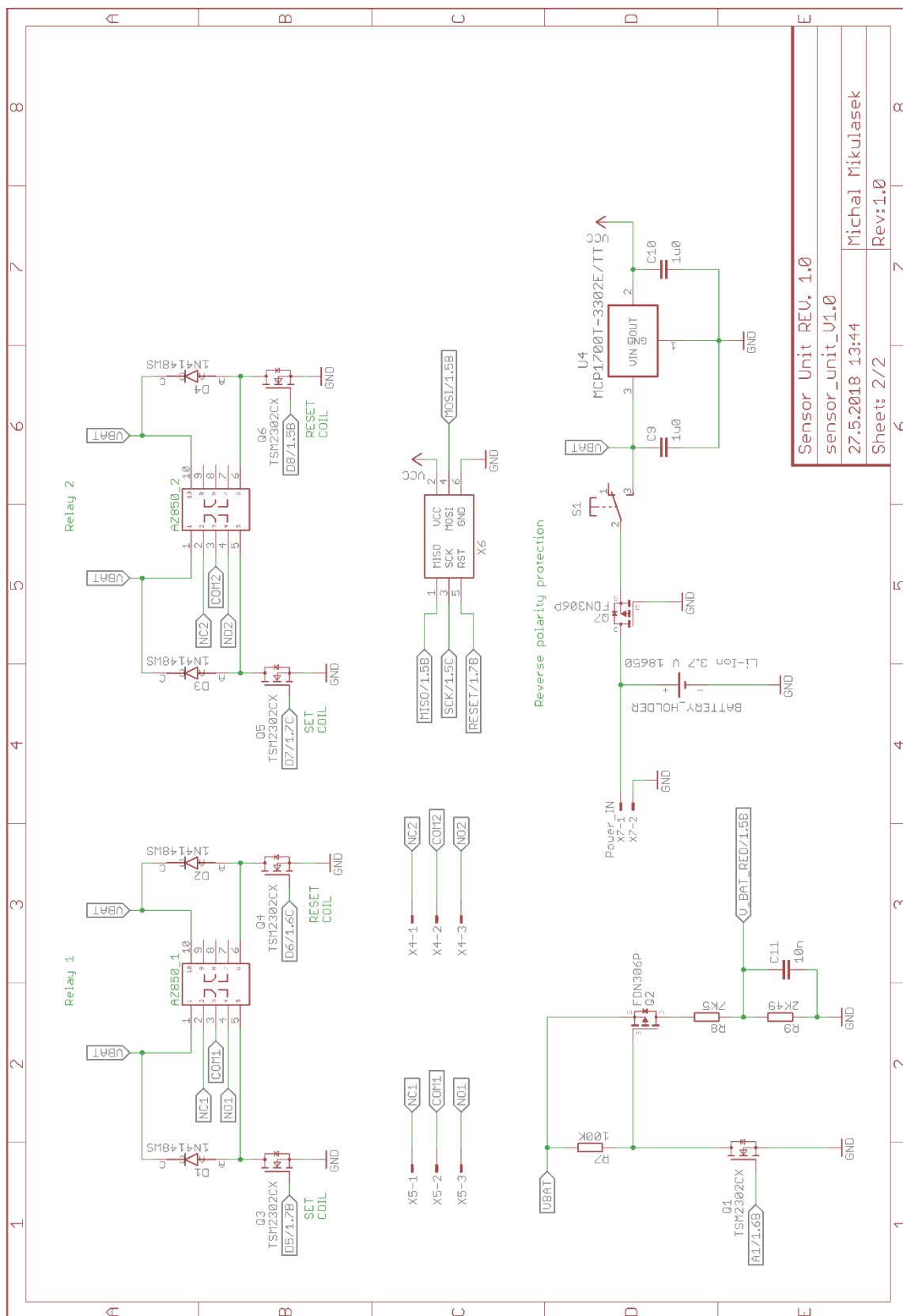
Seznam příloh

- A Schéma zapojení senzorické jednotky verze 1.0
- B DPS pro senzorickou jednotku verze 1.0
- C Schéma zapojení senzorické jednotky verze 2.0
- D DPS pro senzorickou jednotku verze 2.0
- E Schéma zapojení centrální jednotky verze 1.0
- F DPS pro centrální jednotku verze 1.0
- G Obsah přiloženého paměťového média

A Schéma zapojení senzorické jednotky verze 1.0



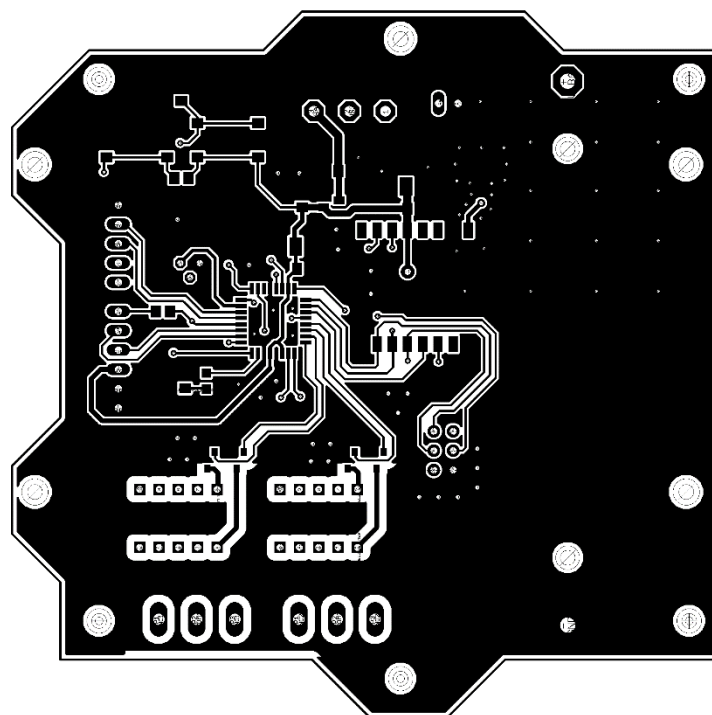
Obr. Příloha.0.1: Schéma zapojení senzorické jednotky verze 1.0 část 1.



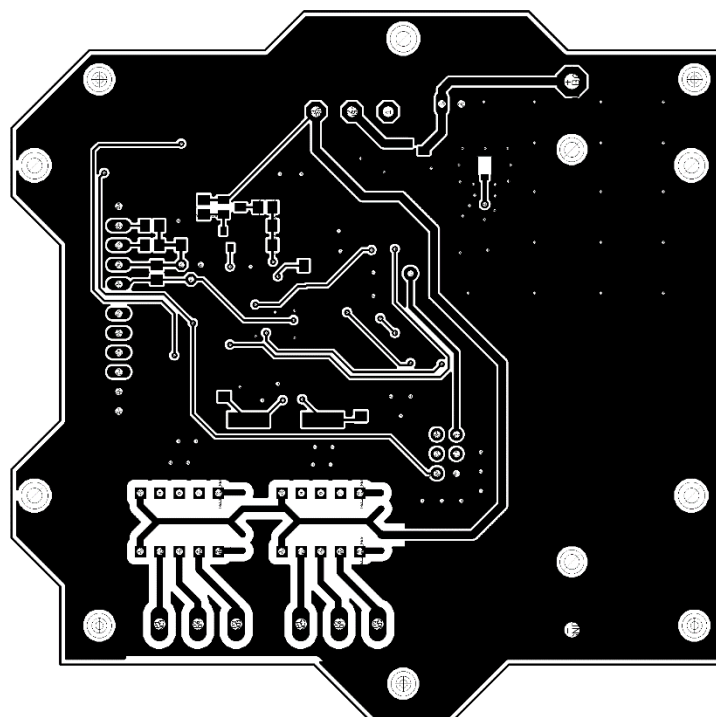
Sensor Unit REV. 1.0
sensor_unit_v1.0
27.5.2018 13:44
Sheet: 2/2
Rev:1.0

Obr. Příloha.0.2: Schéma zapojení senzorické jednotky verze 1.0 část 2.

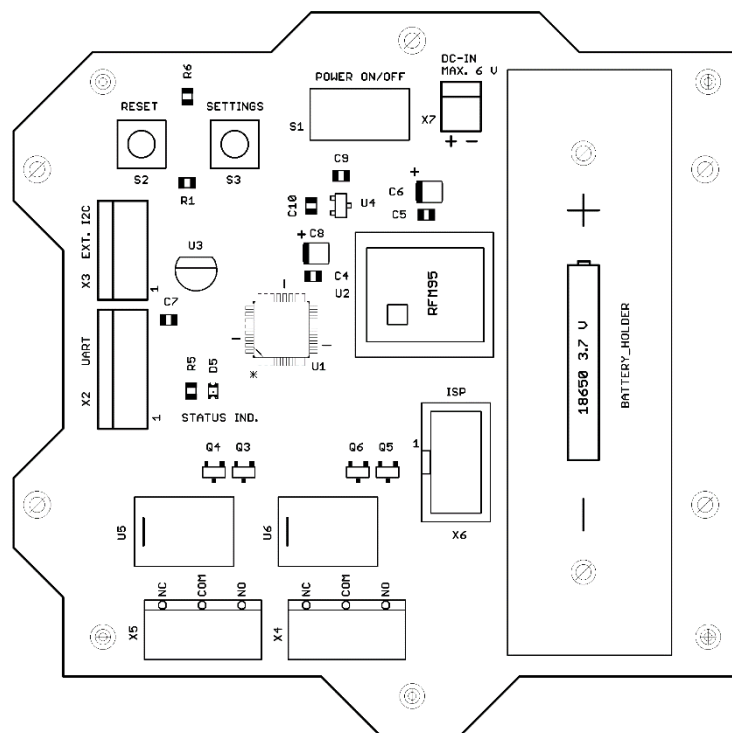
B DPS pro senzorickou jednotku verze 1.0



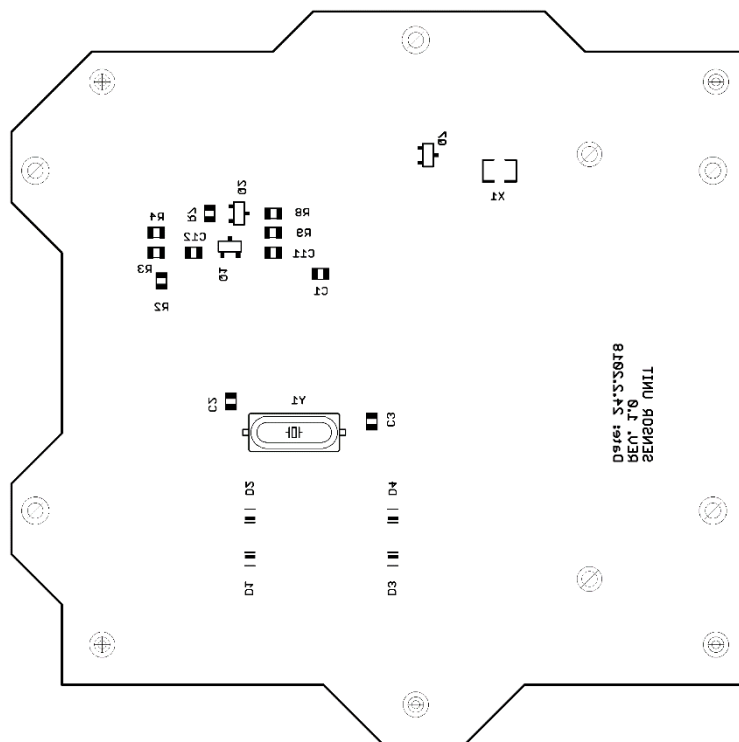
Obr. Příloha.0.3: Měděná vrstva - vrchní (Top).



Obr. Příloha.0.4: Měděná vrstva - spodní (Bottom).

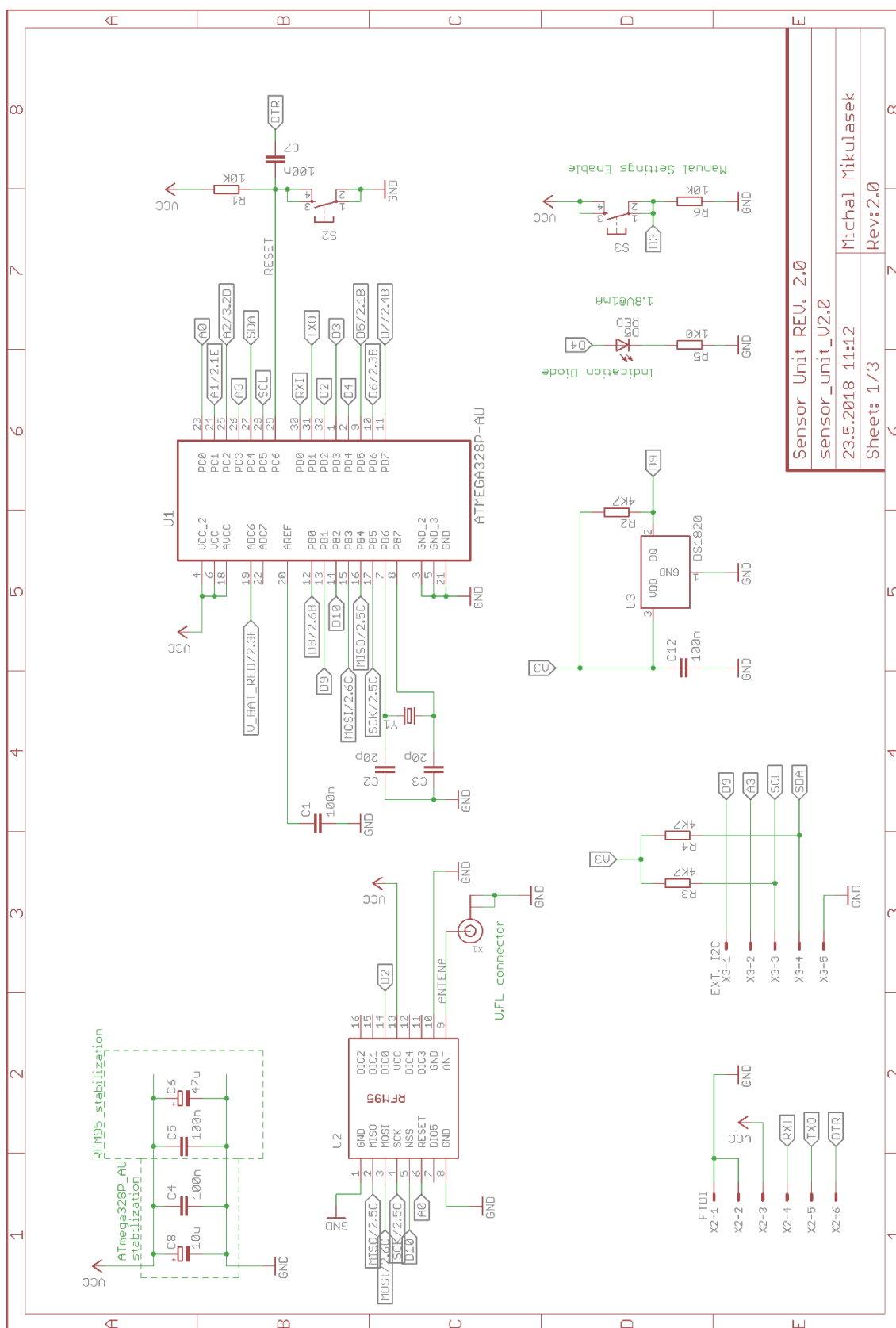


Obr. Příloha.0.5: Osazovací výkres - vrchní (Top).

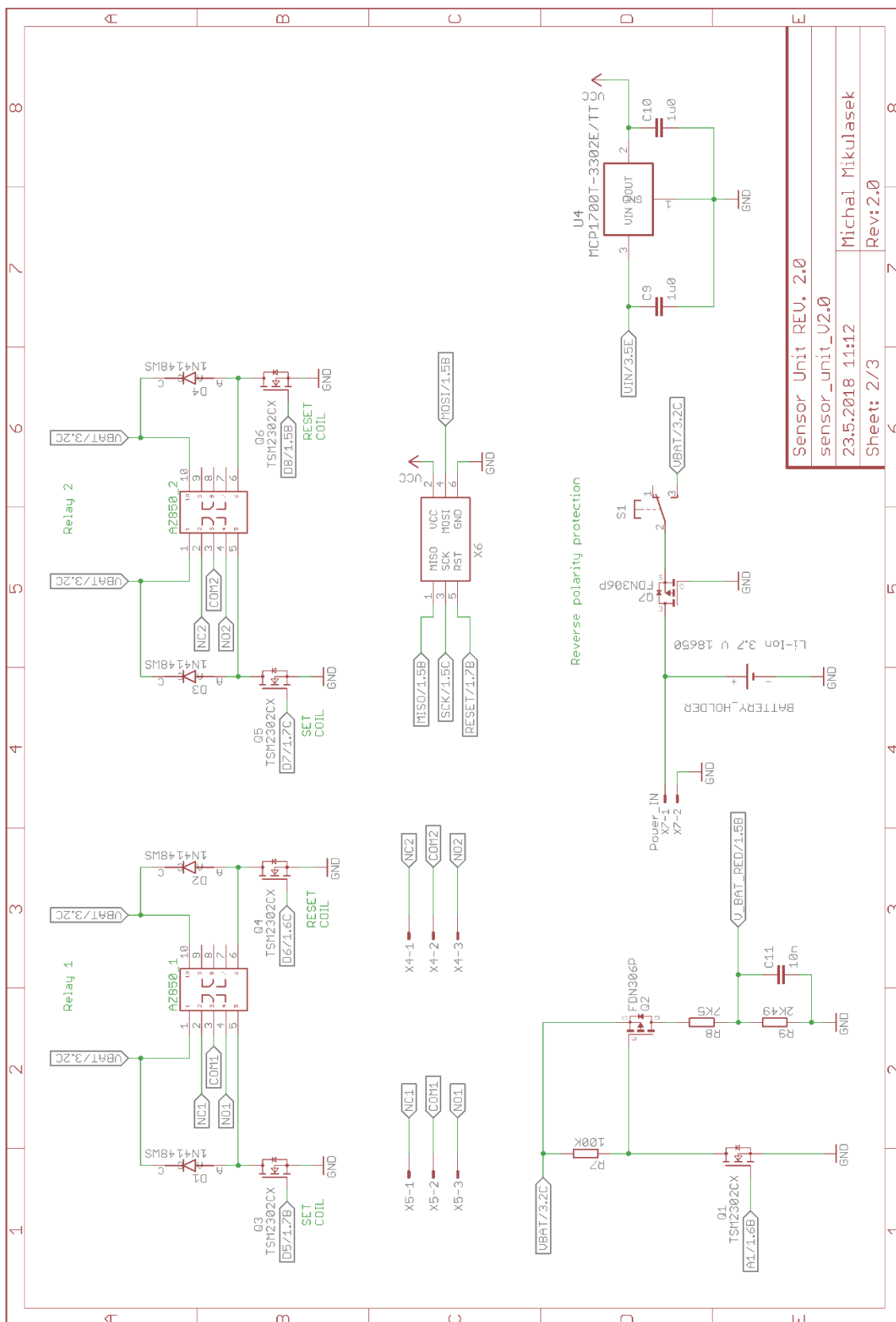


Obr. Příloha.0.6: Osazovací výkres - spodní (Bottom).

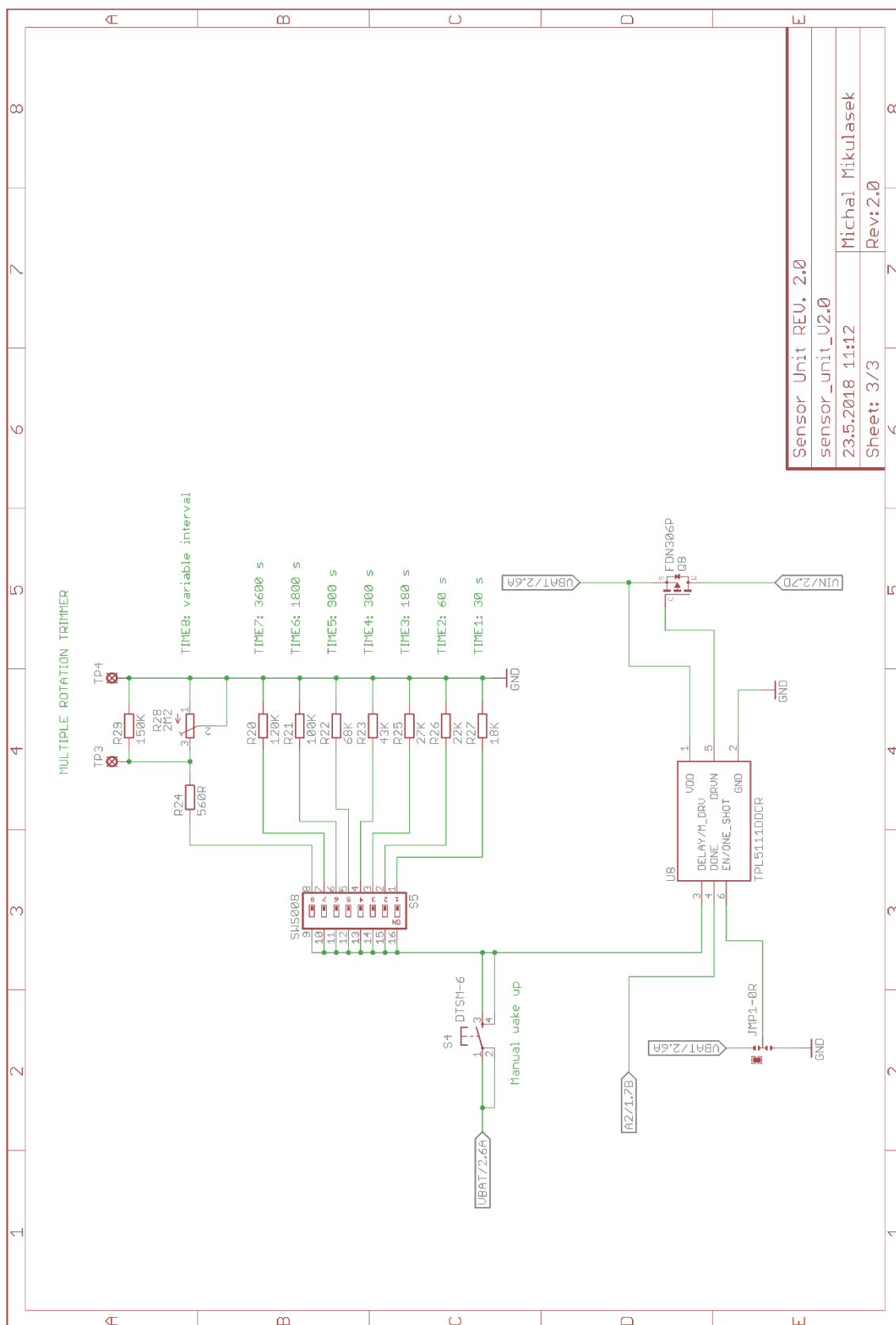
C Schéma zapojení senzorické jednotky verze 2.0



Obr. Příloha.0.7: Schéma zapojení senzorické jednotky verze 2.0 část 1.

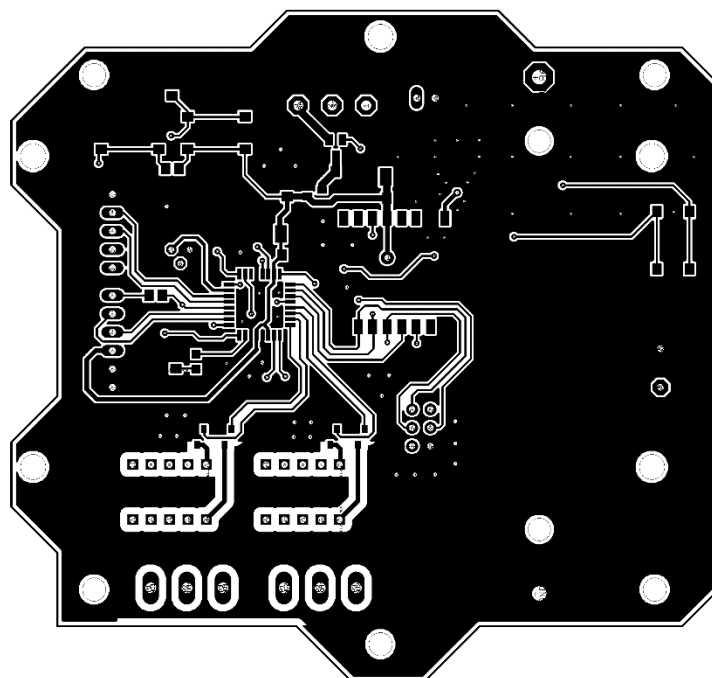


Obr. Příloha.0.8: Schéma zapojení senzorické jednotky verze 2.0 část 2.

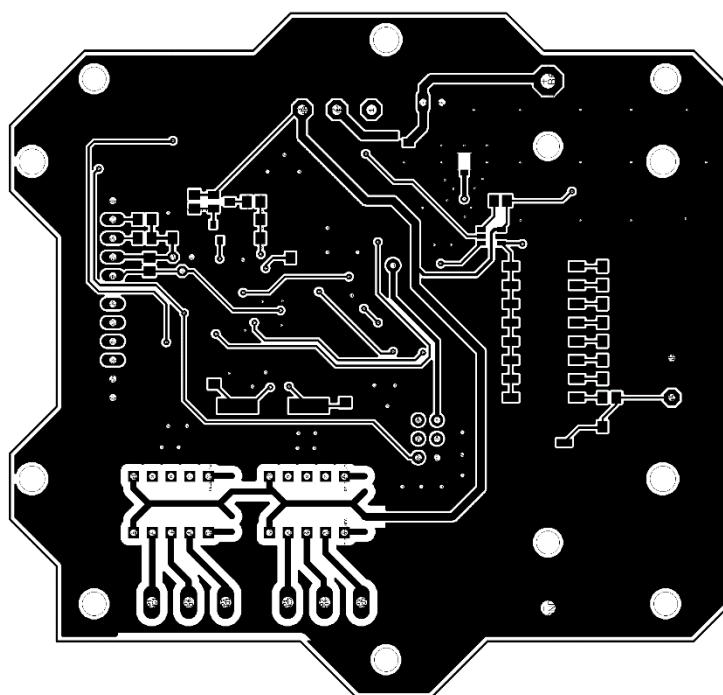


Obr. Příloha.0.9: Schéma zapojení senzorické jednotky verze 2.0 část 3.

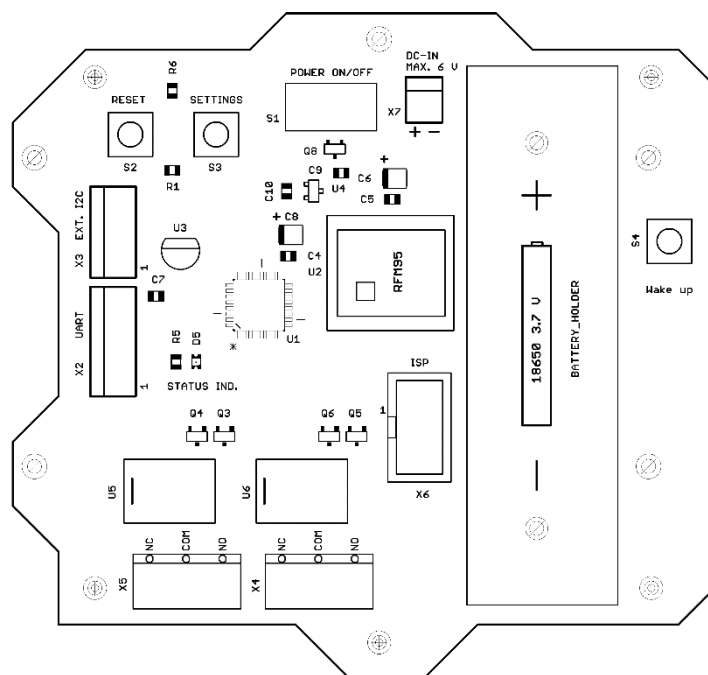
D DPS pro senzorickou jednotku verze 2.0



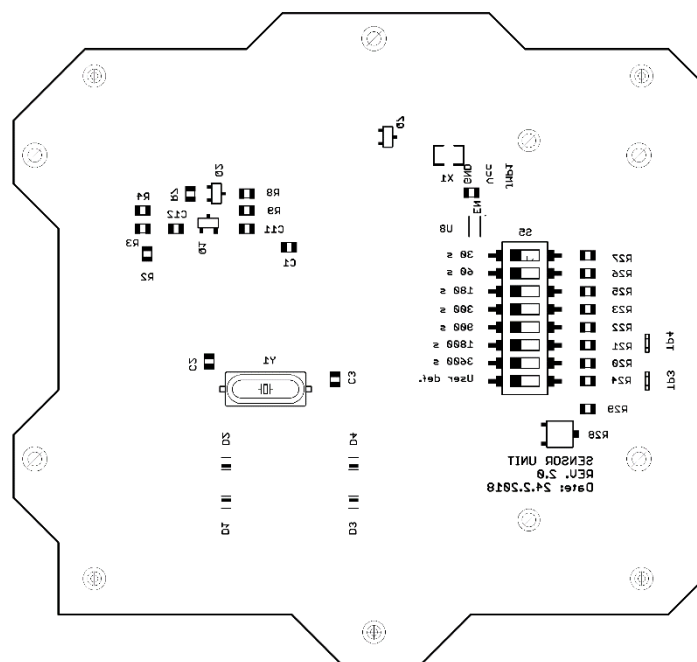
Obr. Příloha.0.10: Měděná vrstva - vrchní (Top).



Obr. Příloha.0.11: Měděná vrstva - spodní (Bottom).

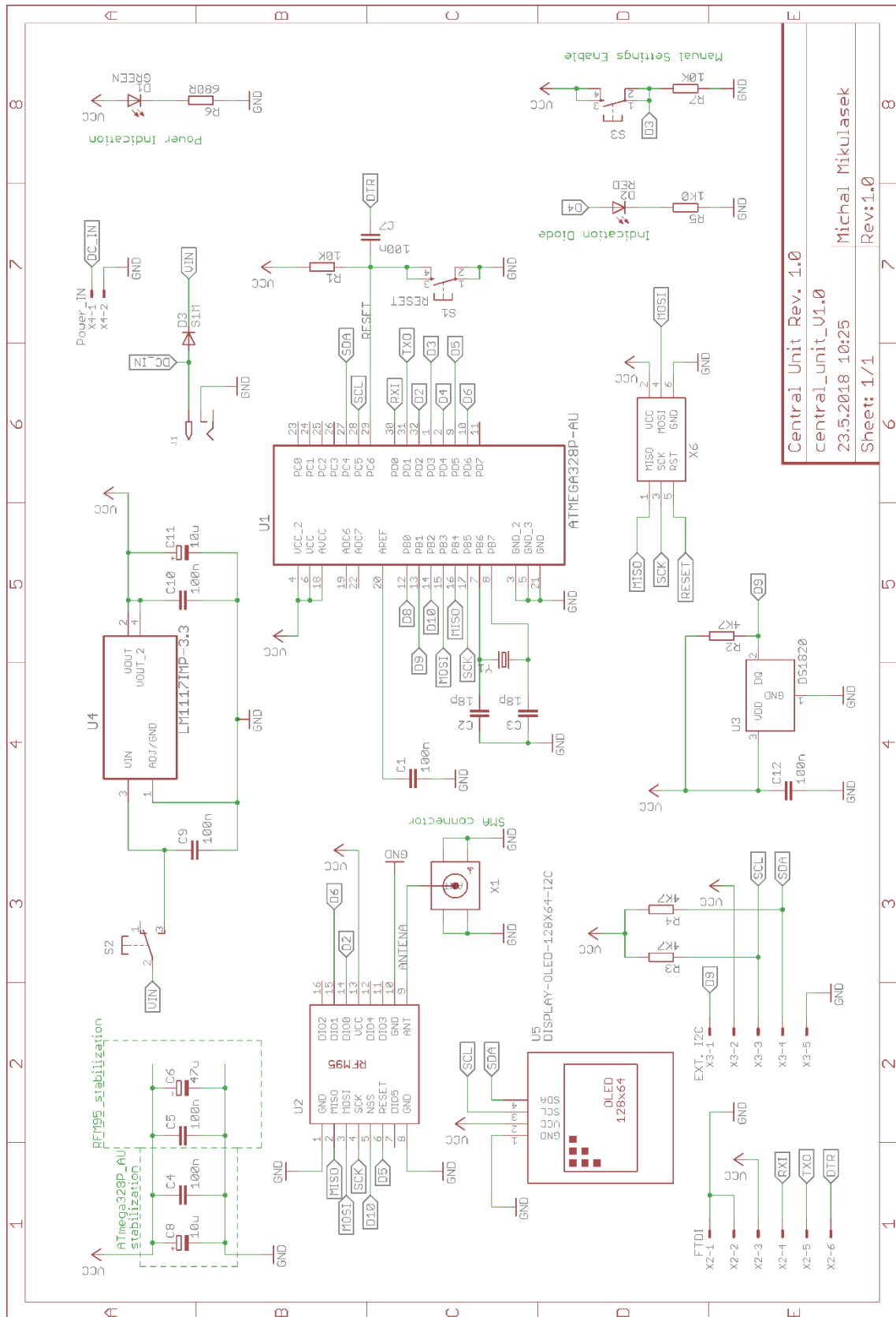


Obr. Příloha.0.12: Osazovací výkres - vrchní (Top).



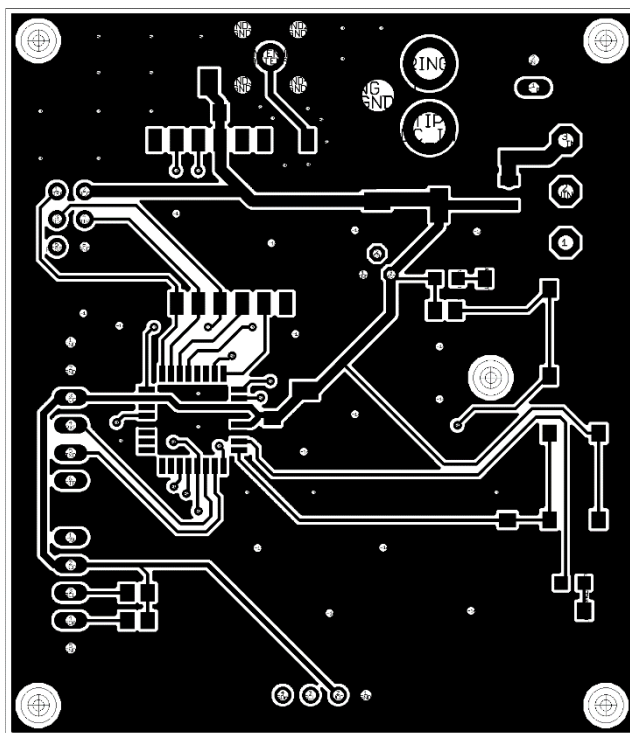
Obr. Příloha.0.13: Osazovací výkres – spodní (Bottom).

E Schéma zapojení centrální jednotky verze 1.0

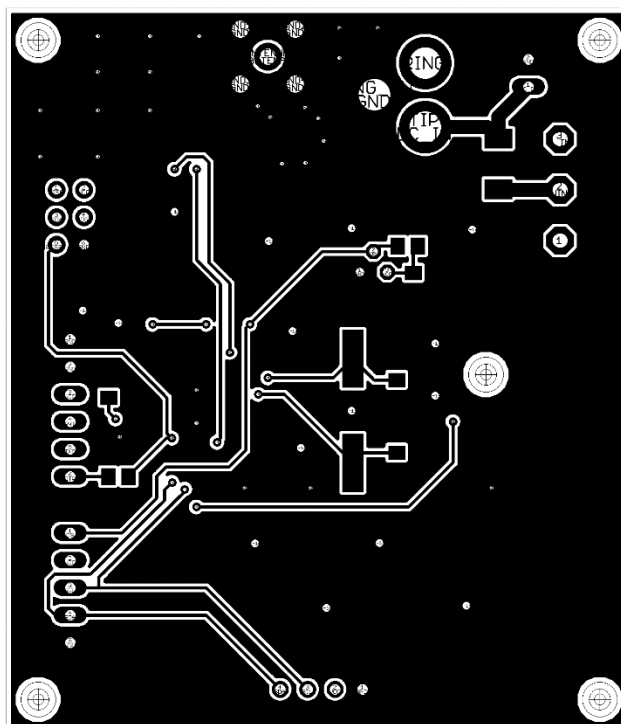


Obr. Příloha.0.14: Schéma zapojení centrální jednotky verze 1.0.

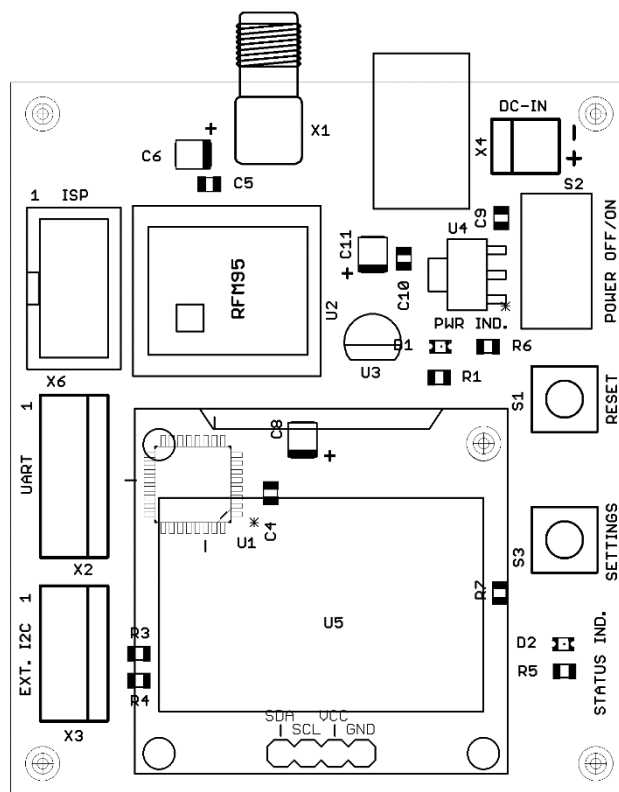
F DPS pro centrální jednotku verze 1.0



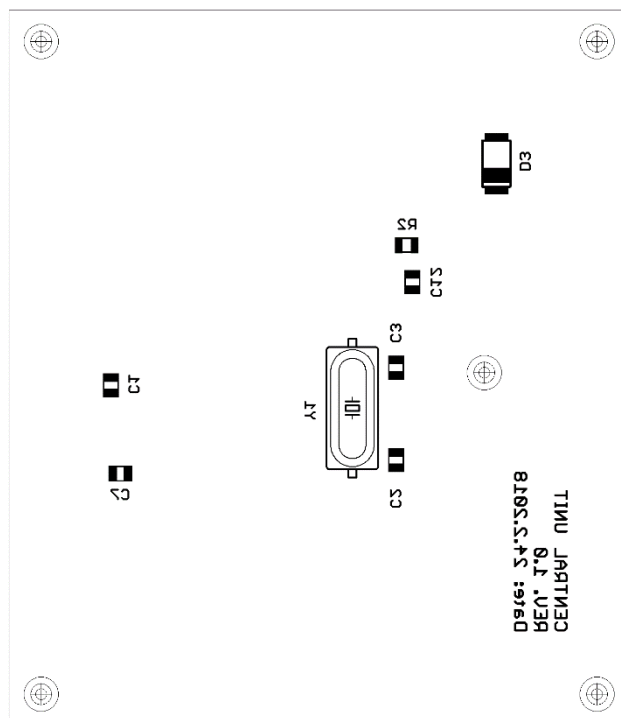
Obr. Příloha.0.15: Měděná vrstva - vrchné (Top).



Obr. Příloha.0.16: Měděná vrstva - spodní (Bottom).



Obr. Příloha.0.17: Osazovací výkres - vrchní (Top).



Obr. Příloha.0.18: Osazovací výkres - spodní (Bottom).

G Obsah příloženého paměťového média

- BP_Mikulášek_Michal.pdf text BP práce
- Box, cover soubory pro 3D tisk (krabička pro centrální jednotku a krytka externího čidla senzorické jednotky)
- Firmware firmwary pro obě jednotky
- PCB Eagle soubory, Gerber soubory použité k výrobě DPS, obrázky jednotlivých vrstev DPS, seznam použitých komponentů
 - Sensor_unit_V1.0
 - Sensor_unit_V2.0
 - Central_unit_V1.0
 - BP_Mikulášek_Michal_BOM.xlsx
- Photodocumentation Fotodokumentace praktické realizace BP